



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL141584

ANALISIS PENGARUH VARIASI ARUS *ELECTRIC ARC FURNACE* PADA PROSES PELEBURAN *DIRECT REDUCED IRON* TERHADAP KANDUNGAN Fe TOTAL DAN *RECOVERY* Fe DALAM PROSES PEMBUATAN *PIG IRON*

Luki Wijaya

NRP 02511440000057

Dosen Pembimbing :

Wikan Jatimurti, ST., M.Sc.

Sungging Pintowantoro, Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2018



TUGAS AKHIR - TL141584

**ANALISIS PENGARUH VARIASI ARUS
ELECTRIC ARC FURNACE PADA PROSES
PELEBURAN *DIRECT REDUCED IRON*
TERHADAP KANDUNGAN Fe TOTAL DAN
RECOVERY Fe DALAM PROSES
PEMBUATAN *PIG IRON***

Luki Wijaya
NRP 02511440000057

Dosen Pembimbing :
Wikan Jatimurti, ST., M.Sc.
Sungging Pintowantoro, Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

**ANALYSIS ON EFFECT OF VARIATION
OF CURRENT ELECTRIC ARC FURNACE
IN SMELTING PROCESS OF DIRECT
REDUCED IRON ON TOTAL OF CONTENT
Fe AND RECOVERY Fe IN THE PIG IRON
MAKING PROCESS**

Luki Wijaya
NRP 02511440000057

Advisor :
Wikan Jatimurti, ST., M.Sc.
Sungging Pintowantoro, Ph.D

Department of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty Of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISIS PENGARUH VARIASI ARUS *ELECTRIC*
ARC FURNACE PADA PROSES PELEBURAN
DIRECT REDUCED IRON TERHADAP
KANDUNGAN Fe TOTAL DAN *RECOVERY* Fe
DALAM PROSES PEMBUATAN *PIG IRON***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Metalurgi Ekstraksi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

LUKI WIJAYA

NRP. 02511440000057

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :
Wikan Jatimurti, ST., M.Sc. (Pembimbing I)
Sungging Pintowantoro, Ph.D (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISIS PENGARUH ARUS *ELECTRIC ARC FURNACE*
PADA PROSES PELEBURAN *DIRECT REDUCED IRON*
TERHADAP KANDUNGAN Fe TOTAL DAN *RECOVERY*
Fe DALAM PROSES PEMBUATAN *PIG IRON***

Nama Mahasiswa : Luki Wijaya
NRP : 02511440000057
Jurusan : Dept. Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Wikan Jatimurti, ST., M.Sc.
Co-Pembimbing : Sungging Pintowantoro, Ph.D

ABSTRAK

Kebutuhan akan baja di Indonesia tidak sebanding dengan produksi baja. Sedangkan ketersediaan akan bahan baku pembuatan baja di Indonesia khususnya pasir besi sangat melimpah. Namun, ketersediaan pasir besi ini belum dapat diolah secara maksimal, kandungan Fe yang dimiliki pasir besi juga cukup rendah sekitar 57%. Maka dari itu dibutuhkan suatu teknologi yang dapat meningkatkan kandungan Fe yang terdapat pada pasir besi sehingga dapat meningkatkan nilai ekonomi dan kegunaan dari mineral pasir besi tersebut. Teknologi yang dapat digunakan untuk peningkatan kandungan Fe antara lain adalah Direct Reduced Iron dan Electric Arc Furnace.

Pada penelitian ini akan membahas mengenai proses pembuatan direct reduced iron dan pengaruh arus yang digunakan pada pembuatan pig iron terhadap kandungan Fe total dan recovery Fe. Adapun variasi arus yang digunakan sebesar 140 A, 160 A, 180 A dan 200 A. Pada pembuatan direct reduced iron, briket pasir besi akan direduksi dengan cara dipanaskan menggunakan muffle furnace sampai temperatur 1350°C selama 12 jam lalu didinginkan selama 12 jam didalam muffle furnace.

Selanjutnya hasil direct reduced iron dilebur menggunakan electric arc furnace dengan variasi arus dan tegangan sebesar 16,2 volt selama 6 menit. Lalu hasil peleburan direct reduced iron dilakukan pengujian karakterisasi menggunakan alat uji XRD dan EDX.

Dari hasil penelitian terlihat bahwa direct reduced iron menghasilkan kandungan Fe total sebesar 75,722%. Selanjutnya pada hasil peleburan direct reduced iron dengan arus peleburan 180 A memiliki kandungan Fe total dan recovery Fe yang paling tinggi. Kandungan Fe total yang dihasilkan sebesar 91,585% dan recovery Fe sebesar 98,780%.

Kata Kunci : Direct Reduced Iron, Pasir Besi, Pig Iron, Recovery Fe

ANALYSIS ON EFFECT OF VARIATION OF CURRENT ELECTRIC ARC FURNACE IN SMELTING PROCESS OF DIRECT REDUCED IRON ON THE TOTAL Fe CONTENT AND Fe RECOVERY IN THE PIG IRON MAKING PROCESS

Name : Luki Wijaya
SRN : 02511440000057
Major : Materials and Metallurgical Engineering
Advisor : Wikan Jatimurti, ST., M.Sc.
Co-Advisor : Sungging Pintowantoro, Ph.D

ABSTRACT

The need for steel in Indonesia is not proportional to steel production. While the availability of steel raw materials in Indonesia, especially iron sand is very abundant. However, the availability of this iron sand can not be processed optimally, iron content in iron sand is also quite low around 57%. Therefore a technology that can increase Fe content in iron sand is needed to increase the economic value and usefulness of the iron sand mineral. One of among technologies that can be used to increase Fe content is Direct Reduced Iron and Electric Arc Furnace.

This research will discuss about direct reduced iron making process and the influence of current used in making pig iron to the total Fe content and Fe recovery. The current variation are 140 A, 160 A, 180 A and 200 A. In the manufacture of direct reduced iron, iron sand briquettes reduced by heating using muffle furnace to 1350°C for 12 hours and then cooled for 12 hours in the muffle furnace. Furthermore, the result of direct reduced iron melted using electric arc furnace with variation of current and voltage of 16.2 volts for 6 minutes. Then the result of direct reduced iron smelting is done by characterization test using XRD and EDX test equipments.

From the results of the research shows that direct reduced iron produces a total Fe content of 75.722%. Furthermore, at the result of smelting direct reduced iron with 180 A smelting current has the highest total Fe content and the highest Fe recovery. The total Fe content produced is 91.585% and the recovery Fe is 98,780%.

Keywords : Direct Reduced Iron, Iron Sand, Pig Iron, Recovery Fe

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan limpahan karunia, terang pikiran, kesehatan, keselamatan, dan semangat sehingga penulis dapat menyelesaikan seluruh rangkaian penyusunan laporan Tugas Akhir dengan judul “**Analisis Pengaruh Variasi Arus *Electric Arc Furnace* Pada Proses Peleburan *Direct Reduced Iron* Terhadap Kandungan Fe Total dan *Recovery Fe* dalam Proses Pembuatan *Pig Iron***”. Adapun laporan ini disusun dan diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan studi di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI – Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan ini masih jauh dari kesempurnaan. Hal ini dikarenakan adanya keterbatasan kemampuan penulis dalam penyusunan laporan ini. Namun, penulis dapat mewujudkan laporan ini secara lengkap berkat adanya perhatian, bimbingan, dan petunjuk dari berbagai pihak. Dengan adanya kekurangan dan kesalahan dalam penulisan laporan ini. Untuk itu, saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan untuk menjadi evaluasi selanjutnya.

Demikian penulis berharap semoga laporan ini dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya khususnya bagi kemajuan di bidang pengolahan Mineral di Indonesia.

Surabaya, Januari 2018

Penulis,

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix

BAB I PENDAHULUAN

1.1	Latar Belakang	1
1.2	Rumusan Masalah	4
1.3	Batasan Masalah	4
1.4	Tujuan Penelitian	5
1.5	Manfaat Penelitian	5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1	Pasir Besi	7
2.2	Batubara	9
2.3	Batu Kapur	11
2.4	Proses Reduksi dalam Besi pada Pembuatan <i>Direct Reduced Iron</i>	13
2.5	<i>Direct Reduced Iron</i>	15
2.6	<i>Electric Arc Furnace</i>	16
2.7	Penggunaan Arus pada <i>Electric Arc Furnace</i>	18
2.8	Termodinamika Pasir Besi	20
2.8.1	Termokimia Reaksi	20
2.8.2	Diagram Ellingham	20
2.8.3	Tahapan Reaksi Reduksi Pasir Besi Oleh Gas CO..	23

2.8.4 Diagram Boudouard-Gaussner	24
2.9 Kinetika Reduksi Besi	26
2.10 <i>Pig Iron</i>	29
2.11 Penelitian Sebelumnya.....	30

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian	35
3.2 Bahan Penelitian	36
3.2.1 Pasir Besi.....	36
3.2.2 Batubara	37
3.2.3 Batu Kapur	37
3.2.4 Tepung Tapioka.....	38
3.2.5 Air	38
3.2.6 LPG	39
3.2.7 Fluks	39
3.2.8 Elektroda Grafit.....	40
3.3 Peralatan Penelitian	40
3.3.1 Sagger.....	40
3.3.2 Alat kompaksi	41
3.3.3 <i>Muffle Furnace</i>	41
3.3.4 Timbangan Digital.....	42
3.3.5 Ayakan	42
3.3.6 <i>Thermocouple</i>	43
3.3.7 <i>Blower</i>	43
3.3.8 <i>Oven</i>	44
3.3.9 Alat Tumbuk	44
3.3.10 <i>Power Supply</i>	45
3.3.11 <i>Crucible</i>	46
3.4 Pelaksanaan Penelitian	46
3.4.1 Preparasi Material	46
3.4.2 Proses Reduksi	48
3.4.3 Persiapan Proses <i>Smelting</i>	49
3.4.4 Proses <i>Smelting</i>	49

3.5	Pengujian Penelitian.....	51
3.5.1	<i>X-Ray Diffraction</i>	51
3.5.2	<i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>	52
3.5.3	<i>Proximate Analysis</i>	53
3.5.4	<i>Recovery Fe</i>	55
3.6	Rancangan Penelitian	56
3.6.1	Rancangan Penelitian Pembuatan <i>Sponge Iron</i>	56
3.6.2	Rancangan Penelitian Pembuatan <i>Pig Iron</i>	56

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1	Karakterisasi Bahan Penelitian	59
4.1.1	Pasir Besi.....	59
4.1.2	Batubara	60
4.1.3	Dolomit.....	61
4.2	Karakterisasi <i>Sponge Iron</i> Hasil Reduksi Pasir Besi ..	63
4.2.1	Kadar Fe yang Terbentuk pada <i>Sponge Iron</i> Hasil Reduksi Briket Pasir Besi	63
4.2.2	Indetifikasi Fasa dari <i>Sponge Iron</i> Hasil Reduksi Pasir Besi.....	64
4.3	Pengaruh Arus <i>Electric Arc Furnace</i> terhadap Kandungan Fe Total pada <i>Pig Iron</i>	67
4.4	Pengaruh Arus <i>Electric Arc Furnace</i> terhadap <i>Recovery Fe</i> pada <i>Pig Iron</i>	72
4.5	Indetifikasi Fasa dari <i>Pig Iron</i>	75
4.5.1	Analisa Hasil XRD <i>Pig Iron</i> dengan Arus Peleburan <i>Direct Reduced Iron</i> sebesar 140 A.....	77
4.5.2	Analisa Hasil XRD <i>Pig Iron</i> dengan Arus Peleburan <i>Direct Reduced Iron</i> sebesar 160 A.....	77
4.5.3	Analisa Hasil XRD <i>Pig Iron</i> dengan Arus Peleburan <i>Direct Reduced Iron</i> sebesar 180 A.....	77
4.5.4	Analisa Hasil XRD <i>Pig Iron</i> dengan Arus Peleburan <i>Direct Reduced Iron</i> sebesar 200 A.....	78

4.6	Karakterisasi dari <i>Slag</i> Hasil Peleburan <i>Direct Reduced Iron</i>	78
-----	---	----

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	83
5.2	Saran	83

DAFTAR PUSTAKA	xxi
-----------------------------	------------

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Pasir Besi	8
Gambar 2.2	Diagram Ternary Sistem $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$	8
Gambar 2.3	Batubara.....	10
Gambar 2.4	Batu Kapur.....	12
Gambar 2.5	Tunnel kiln dalam Proses Hoganas.....	13
Gambar 2.6	Susunan Sagger pada Kereta dalam Hoganas Kiln	14
Gambar 2.7	Susunan Bahan Baku pada Penampang Horizontal Sagger	14
Gambar 2.8	Produk <i>direct reduced iron</i> pada Umumnya.....	16
Gambar 2.9	Elektroda pada <i>Electric Arc Furnace</i>	19
Gambar 2.10	Diagram Ellingham untuk Oksida Logam.....	22
Gambar 2.11	Diagram Ellingham untuk Reduksi Besi Oksida.....	23
Gambar 2.12	Diagram Gaussner - Boudouard	25
Gambar 2.13	Garis Besar Mekanisme Reduksi untuk Bijih Besi Berpori	27
Gambar 2.14	Mekanisme Reduksi Bijih Besi i	29
Gambar 2.15	<i>Pig Iron</i>	30
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	36
Gambar 3.2	Pasir Besi	37
Gambar 3.3	Batubara.....	37
Gambar 3.4	Batu Kapur.....	38
Gambar 3.5	Tepung Tapioka	38
Gambar 3.6	LPG.....	39
Gambar 3.7	Fluks SiO_2	39
Gambar 3.8	Elektroda Grafit	40
Gambar 3.9	Sagger	41
Gambar 3.10	Alat Kompaksi	41

Gambar 3.11	<i>Muffle Furnace</i>	42
Gambar 3.12	Timbangan Digital	42
Gambar 3.13	Ayakan.....	43
Gambar 3.14	<i>Thermocouple</i>	43
Gambar 3.15	<i>Blower</i>	44
Gambar 3.16	<i>Oven</i>	44
Gambar 3.17	Alat Tumbuk.....	45
Gambar 3.18	<i>Power Supply</i>	45
Gambar 3.19	<i>Crucible</i>	46
Gambar 3.20	Briket <i>Pillow</i> Pasir Besi.....	47
Gambar 3.21	Susunan Briket dan <i>Reduction Mix</i>	48
Gambar 3.22	Susunan Peralatan	48
Gambar 3.23	Skematik Preparasi Proses <i>Smelting</i> dengan <i>Electric Arc Furnace</i>	50
Gambar 3.24	XRD PAN <i>Analytical</i>	51
Gambar 3.25	EDX	52
Gambar 4.1	Grafik XRD Pasir Besi Sukabumi	60
Gambar 4.2	Hasil Pengujian XRD Batu Kapur.....	62
Gambar 4.3	Hasil Pengujian XRD <i>Direct Reduced Iron</i>	65
Gambar 4.4	Pengaruh Arus terhadap Kandungan Fe Total pada <i>Pig Iron</i> dan Kenaikan Kandungan Fe Total	68
Gambar 4.5	Pengaruh Arus terhadap <i>Recovery Fe</i> pada <i>Pig Iron</i>	73
Gambar 4.6	Hasil Pengujian XRD <i>Pig Iron</i> dengan Arus....	76
Gambar 4.7	Hasil Pengujian XRD <i>Slag</i> dengan Arus	80

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Kategori Batubara dan Nilai Kalori	10
Tabel 2.2	Konsumsi Bahan dan Energi dalam Proses <i>Hoganas</i>	15
Tabel 2.3	Input dan Output Material di EAF	19
Tabel 3.1	Rancangan Penelitian Pembuatan <i>Direct Reduced Iron</i>	56
Tabel 3.2	Rancangan Penelitian Pembuatan <i>Pig Iron</i>	57
Tabel 4.1	Hasil Pengujian EDX Konsentrat Pasir Besi	59
Tabel 4.2	Hasil Pengujian <i>Proximate Analysis</i> Batubara	61
Tabel 4.3	Hasil Pengujian EDX Dolomit	61
Tabel 4.4	Hasil Pengujian EDX <i>Direct reduced Iron</i>	63
Tabel 4.5	Penggunaan Arus dalam Penelitian	67
Tabel 4.6	Komposisi Unsur pada <i>Pig Iron</i> Hasil Peleburan ...	67
Tabel 4.7	Perhitungan Massa dan <i>Recovery Fe</i> pada <i>Pig Iron</i>	73
Tabel 4.8	Hasil Pengujian EDX <i>Slag</i> Hasil Peleburan <i>Direct Reduced Iron</i>	79

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tingkat konsumsi baja dari suatu negara dapat dijadikan sebagai indikator dari kemajuan negara tersebut, dengan tingginya tingkat konsumsi baja dari suatu negara maka dapat dikatakan bahwa negara tersebut merupakan negara maju. Pada tahun 2014 menurut (Anthony de Carvalho dkk, 2017), kapasitas produksi baja di Indonesia sebanyak 9,7 juta ton cukup rendah jika dibandingkan dengan negara-negara di Asia Tenggara lainnya yaitu Thailand sebanyak 9,9 juta ton, Malaysia 10,7 juta ton dan Vietnam sebanyak 12 juta ton. Pada tahun 2014 konsumsi baja Indonesia sebanyak 61,6 kg perkapita per tahun (World Steel Association, 2014). Angka ini masih di bawah konsumsi negara-negara di Asia Tenggara seperti Filipina sebanyak 79,5 kg, Vietnam sebanyak 151 kg, Thailand sebanyak 291,4 kg, Malaysia sebanyak 392,3 dan Singapura sebanyak 1.018,7 kg. Dengan kondisi tersebut, berdasarkan Indonesian Iron and Steel Industry Association (IISIA) pada tahun 2015 memperkirakan pada tahun 2020 kebutuhan baja Indonesia akan meningkat menjadi sekitar 27 juta ton. Untuk mengatasi kebutuhan akan baja Indonesia beberapa langkah telah dilakukan oleh pemerintah antara lain membangun pabrik baja terintegrasi oleh PT Krakatau POSCO, ekspansi PT Krakatau Steel Tbk serta pembangunan pabrik baja oleh Gunung Group, sehingga kapasitas pabrik baja di Indonesia dapat mencapai 20 juta ton. Kekurangan kebutuhan baja Indonesia dapat terpenuhi dengan pembangunan pabrik-pabrik baja baru dengan kapasitas 6-8 juta ton. (Zulhan, 2013).



Di Indonesia terdapat ketersediaan mineral besi terutama dalam bentuk pasir besi sebanyak 1.647.778.892 ton (Bambang Pardianto, 2011), tetapi sampai saat ini belum ada pengolahan besi baja dengan bahan baku pasir besi. Pasir besi di Indonesia tersebar di pulau Sumatera, pulau Kalimantan, pulau Sulawesi, pulau Papua dan khususnya di pulau Jawa. Di pulau Jawa pasir besi banyak ditemukan di pesisir pantai selatan Jawa barat sebanyak 35.612.966,9 ton. (Rosana dkk, 2013). Pasir besi merupakan mineral yang banyak mengandung senyawa besi oksida, seperti magnetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3), ilmenit (FeTiO_3) dan mineral lain seperti alumina, silika dalam jumlah sedikit. Akan tetapi, pasir besi umumnya digunakan sebagai bahan bangunan sehingga secara nilai ekonomi sangat rendah. Dengan adanya unsur besi oksida, jika diolah akan meningkatkan nilai ekonominya sehingga meningkatkan kadar besi dalam mineral pasir besi tersebut. Maka dari itu, diperlukan suatu strategi pengolahan pasir besi strategi yang dapat mensinergikan produksi besi dan baja dari hulu ke hilir, yaitu pada pengolahan *iron ore concentrate*, *iron sand concentrate*, *hot bricket iron*, *pig iron*, *Direct Reduced Iron*, *Electric Arc Furnace*, dsb.

Salah satu teknologi yang digunakan adalah *Direct Reduced Iron* (DRI). Teknologi DRI merupakan proses memperoleh besi dengan mereduksi bijih besi dibawah titik leleh besi yang menghasilkan produk berupa *direct reduced iron*. *Direct reduced iron* merupakan produk setengah jadi dari pengolahan pasir besi dengan reduksi secara langsung yang menghasilkan derajat metalisasi minimum 82% (standar IS 15774: 2007). Di New Zealand telah berhasil mengolah pasir besi menjadi *direct reduced iron* dengan teknologi *rotary kiln* berkapasitas 600.000 ton. Selain *rotary*



kiln terdapat teknologi lain yang berpotensi diterapkan untuk mengolah pasir besi menjadi *direct reduced iron* yaitu *tunnel kiln*. India dan Cina merupakan negara yang telah menerapkan teknologi *tunnel kiln* untuk mengolah bijih besinya menjadi *direct reduced iron* dengan kadar Fe mencapai 80%. Teknologi *tunnel kiln* dinilai lebih ekonomis karena biaya pembangunannya hanya sekitar setengah dari biaya pembuatan *rotary kiln* konvensional. Dari teknologi pembuatan *direct reduced iron* yang ada perlu peningkatan kadar Fe dari *direct reduced iron*. Maka dibutuhkan teknologi lain untuk mengolah *direct reduced iron* menjadi *pig iron* yang dapat meningkatkan kadar Fe mencapai 95,7%. (Eugene P dan Helmut O, 1998). Terdapat dua teknologi proses peleburan dari *direct reduced iron* menjadi *pig iron* yaitu dengan teknologi *Induction Furnace* dan *Electric Arc Furnace*. Menurut Koblenzer dkk, 2017, *Electric Arc Furnace* memiliki kelebihan dalam konsumsi energi yang lebih rendah dan ketersediaan *raw material* yang lebih beragam jika dibandingkan dengan *Induction Furnace*. Selain itu, menurut (Arabinda S dkk, 2011), *Electric Arc Furnace* juga memiliki kelebihan dalam kemampuan untuk menghasilkan produk dengan kualitas yang tinggi, pengendalian dalam hal ramah lingkungan yang baik, pengurangan dan pengoptimalan konsumsi energi listrik, rendahnya pengotor yang dihasilkan dan pengontrolan proses yang sepenuhnya canggih. Berdasarkan (Eugene P dan Helmut O, 1998), produktivitas pembuatan *pig iron* meningkat dan biaya yang rendah serta energi yang dibutuhkan untuk melebur scrap sebanyak 1000 kg dengan energi sebesar 389 kWh/ton dan waktu yang dibutuhkan selama 60 menit menjadi *pig iron*. Serta dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Adil Jumali, 2005),



melakukan penelitian tentang peleburan *direct reduced iron* menjadi *pig iron* dengan kapasitas 500 kg dengan energi sebesar 1,2 MW dan waktu selama 70 menit. Melihat dari kelebihan *Tunnel Kiln* serta *Electric Arc Furnace* dibandingkan dengan teknologi yang ada dalam menghasilkan *direct reduced iron* dan *pig iron* maka metode yang tepat untuk digunakan dalam penelitian ini yaitu metode *Tunnel Kiln* dan *Electric Arc Furnace*.

Maka dari itu, dibutuhkan sebuah penelitian yang dapat menjadi solusi dari masalah tentang pengolahan pasir besi menjadi *pig iron* guna menghasilkan kadar serta *recovery* Fe yang maksimal dengan metode *Electric Arc Furnace*. Dengan harapan hasil dari penelitian ini dapat dikembangkan dalam skala besar guna terpenuhinya kebutuhan besi dan baja di Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana pengaruh variasi arus *Electric Arc Furnace* pada proses peleburan *direct reduced iron* terhadap kandungan Fe total dalam proses pembuatan *pig iron*?
2. Bagaimana pengaruh variasi arus *Electric Arc Furnace* pada proses peleburan *direct reduced iron* terhadap *recovery* Fe dalam proses pembuatan *pig iron*?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menganalisa masalah pada penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah yaitu

1. Komposisi pasir besi, batu bara dan batu kapur dianggap homogen.



2. Kanji digunakan sebagai pengikat dan pengaruh reaksi kanji diabaikan.
3. Permeabilitas dan porositas pasir besi diasumsikan sama.
4. Tekanan kompaksi yang diberikan dianggap homogen.
5. Diasumsikan tidak ada *heat loss* dalam *muffle furnace* dan *electric arc furnace*.
6. Sumber energi utama yang digunakan untuk proses peleburan *direct reduced iron* menjadi *pig iron* berasal dari energi listrik.
7. Diasumsikan tekanan atmosfer pada reaktor peleburan bersifat inert.
8. Reaksi yang menyebabkan degradasi elektroda pada pembentukan busur listrik diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Menganalisis pengaruh variasi arus *Electric Arc Furnace* pada proses peleburan *direct reduced iron* terhadap kandungan Fe total dalam proses pembuatan *pig iron*.
2. Menganalisis pengaruh variasi arus *Electric Arc Furnace* pada proses peleburan *direct reduced iron* terhadap *recovery* Fe dalam proses pembuatan *pig iron*.

1.5 Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap perkembangan teknologi metalurgi ekstraksi di Indonesia. Terutama dalam pengembangan proses peleburan *direct reduced iron* menjadi *pig iron*



dalam skala industri menggunakan metode *Electric Arc Furnace*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pasir Besi

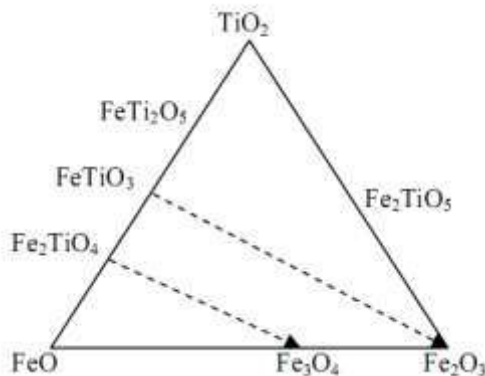
Pasir besi pada umumnya mempunyai komposisi utama besi oksida yaitu magnetit (Fe_3O_4), hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) dan maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) serta silikon oksida (SiO_2) serta senyawa-senyawa lain yang kandungannya lebih rendah (Solihah, 2010). Magnetit memiliki fasa kubus, sedangkan maghemit dan hematit meskipun memiliki komposisi kimia yang sama namun kedua bahan tersebut memiliki fasa yang berbeda. Maghemit berfasa kubus sedangkan hematit berfasa heksagonal. Para peneliti lazimnya menggunakan hematit sebagai bahan dasar dalam proses sintesis serbuk magnet ferit karena hematit memiliki fasa tunggal yang dipercaya akan memiliki sifat kemagnetan yang kuat jika dibandingkan dengan fasa campuran (Yulianto, 2007). Ketiga fasa tersebut dapat diperoleh melalui oksidasi dengan temperatur yang berbeda. Awalnya bahan berupa magnetit dan ketika pemanasan mencapai temperatur 250°C maghemit mulai terbentuk dan mendominasi pada temperatur 350°C . Pada suhu 450°C komposisi fasa maghemit mulai menurun dan bertransformasi fasa menjadi maghemit dengan bentuk struktur tetragonal. Sedangkan hematit mulai muncul pada suhu 550°C berfasa tunggal dan mendominasi pada suhu $700\text{-}800^\circ\text{C}$ (Mashuri dkk, 2007).

Pasir besi merupakan agregat yang mempunyai masa jenis tinggi sekitar 4,2 – 5,2. Pasir besi umumnya terdiri dari mineral *opaque* yang bercampur dengan butiran-butiran nonlogam seperti seperti kuarsa, kalsit, feldspar, ampibol, piroksen, biotit, dan tourmalin. Mineral tersebut terdiri atas magnetit, titaniferous magnetit, ilmenit, limonit, dan hematite. Kandungan besi yang terdapat pada endapan pasir besi utama adalah mineral tetanomagnetik dengan komposisi Fe 60%, Al_2O_3 3,3 %, SiO_2 0,26%, P_2O_5 0,55%, TiO_2 9,2%, MgO 0,6%. Gambar pasir besi ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Pasir Besi (Luki, 2017)

Secara umum, mineral dalam pasir besi terdiri dari dua kompoen dibedakan atas dasar sifat magnetiknya yaitu mineral magnetik dan mineral non magnetik. Oksida besi-titanium ($\text{Fe}_x\text{Ti}_y\text{O}_z$) adalah senyawa magnetik yang cukup dominan selain oksida besi lainnya. Kumpulan senyawa oksida besi-titanium ini terdiri dari mineral-mineral yang memenuhi diagram segitiga (*ternary diagram*) dengan anggota-anggota tepi (*end members*) terdiri dari TiO_2 , FeO dan Fe_2O_3 seperti terlihat dalam Gambar 2.2. Secara alamiah keberadaan mineral besi oksida dalam pasir besi bercampur dengan berbagai mineral lainnya.



Gambar 2.2 Diagram Ternary Sistem $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (Anggraeni, 2008)



Gambar 2.2 menjelaskan berbagai komposisi kimia dari mineral-mineral oksida yang hampir selalu menjadi perhatian dalam mempelajari sifat kemagnetbatuan, yaitu FeO (Wustit), Fe₃O₄ (Magnetit), γ -Fe₂O₃ (maghemit), α -Fe₂O₃ (hematit), FeTiO₃ (ilmenit), Fe₂TiO₄ (ulvospinel), Fe₂TiO₅ (pseudobrookite), dan FeTi₂O₅ (ilmeno-rutile). Diagram fasa tersebut juga memuat informasi mengenai tiga deret sistem, yaitu titanomagnetite, titanohematite, dan pseudobrookite. Pada deret tersebut juga dapat ditambahkan deret titanomaghemit yang diperoleh dengan oksidasi titanomagnetit pada temperatur dibawah 300°C. Dari keempat deret oksida besi titanium tersebut, yang membawa sifat magnetik paling menonjol adalah titanomagnetit.

Adapun proses pemisahan TiO₂ secara konvensional yaitu dengan teknologi *blast furnace*. Teknologi ini akan menimbulkan masalah pada tahap reduksi dan peleburan, pada saat terjadi reduksi antara besi dan TiO, TiO₂ yang terbentuk akan berada di dalam *slag* dan dapat tereduksi menjadi Ti₂O, yang dapat mengakibatkan *slag* akan semakin kental, sehingga sulit untuk memisahkan slag dan cairan besi yang terbentuk di dalam *blast furnace tap hole* (Edi Harianto, 2008).

2.2 Batu Bara

Batubara adalah bahan bakar hidrokarbon padat yang terbentuk dari tumbuhan dalam lingkungan bebas oksigen yang dipengaruhi oleh panas dan tekanan yang berlangsung lama di alam dengan komposisi yang kompleks. Analisis unsur memberikan rumus formula empiris seperti C₁₃₇H₉₇O₉NS untuk bituminus dan C₂₄₀H₉₀O₄NS untuk antrasit. Konsumsi partikel batubara dalam produksi DRI tergantung pada stoikiometri reaksi, kadar *fixed carbon*, dan hilangnya *fixed carbon*. Diperkirakan biaya batubara mencapai 75% dari biaya pembuatan DRI dalam *rotary kiln*. Kualitas batubara sangat berpengaruh dalam seluruh biaya produksi *direct reduced iron*. Untuk itu pemilihan batubara sebagai bahan bakar harus diteliti. Pemilihan batubara sebagai bahan bakar untuk pemanasan dan reduktor, terdapat



beberapa karakteristik yang harus dipenuhi, diantaranya (Ashid, 2014):

- (i) *Proxymate analysis*
- (ii) *Ash fusion temperature*
- (iii) Kadar sulfur
- (iv) *Caking and Swelling index*
- (v) Nilai Kalor



Gambar 2.3 Batubara (*id.wikipedia.org*)

Secara umum batubara dapat dikategorikan berdasarkan nilai kalori, kandungan air, dan kandungan karbon seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kategori Batu Bara dan Nilai kalori (Pelletier, 1984)

No	Kategori	H ₂ O (%)	C (%)	Nilai Kalori (kcal/kg)
1	Lignite	43,4	37,8	4,113
2	Sub-bituminous	23,4	42,4	5,403
3	Low Volatile Sub-bituminous	11,6	47	7,159
4	Medium Volatile Sub-bituminous	5	54,2	7,715
5	High Volatile Sub-bituminous	3,2	64,6	8,427
6	Sub-antrachite	6	83,8	8,271
7	Anthracite	3,2	95,6	8,027



Berdasarkan Tabel 2.1 komponen pembentuk batu bara berdasarkan analisis proksimat terdiri dari : (Moisture = M), abu (Ash = A), materi mudah menguap (Volatile Matter = VM), karbon tertambat (Fixed Carbon = FC). Komponen volatile adalah kandungan yang mudah menguap kecuali moisture. Penguapan terjadi pada temperatur tinggi tanpa adanya udara (pirolisis), umumnya adalah senyawa-senyawa organik, gas CO₂, dan gas SO₂ yang terdapat pada batubara. Penentuan volatile content dilakukan dengan pemanasan pada temperatur 900 – 950°C selama 7 menit. Karbon tertambat adalah jumlah karbon yang terdapat di batubara. Penentuan karbon tertambat dengan cara mengurangi jumlah material mudah menguap dan kandungan abu pada kondisi udara kering (Faris, 2015).

Dalam proses DRI pada umumnya, konsumsi partikel batubara dalam produksi DRI tergantung pada stoikiometri reaksi, Kadar fixed carbon, dan hilangnya fixed carbon. Diperkirakan biaya batubara mencapai 75% dari biaya pembuatan DRI dalam rotary kiln. Kualitas batubara sangat berpengaruh dalam seluruh biaya produksi *direct reduced iron*. Untuk itu, pemilihan batubara untuk proses harus sangat kritis dan hati-hati (Alief, 2015).

2.3 Batu Kapur

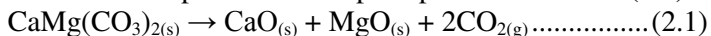
Salah satu batuan sedimen yang banyak ditemui adalah batu kapur. *Limestone* merupakan istilah yang digunakan untuk batuan karbonat atau fosil yang terbentuk secara pokok terdiri dari kalsium karbonat atau kombinasi dari kalsium dan magnesium karbonat dengan variasi sejumlah impuritas seperti silika dan alumina. Sedangkan lime tidak terlalu bervariasi dibandingkan *limestone*, merupakan hasil kalsinasi atau pembakaran batuan *limestone*. Proses kalsinasi memaksa keluar karbon dioksida dari batuan, membentuk kalsium oksida. (Bonyton 1980). Gambar batu kapur ditunjukkan pada Gambar 2.4.



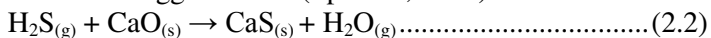
Gambar 2.4 Batu Kapur (*id.wikipedia.org*)

Batu kapur ditemukan secara alami dalam mineral dengan bentuk polimorf. Polimorf merupakan sebuah mineral dengan rumus kimia yang sama tetapi memiliki struktur kristal yang berbeda. Kalsium karbonat (CaCO_3) memiliki tiga macam bentuk polimorf, yaitu kalsit, aragonit, dan vaterit dengan struktur kristal berturut-turut rombohedral, heksagonal, dan ortorombik. Ketiga struktur tersebut kalsit memiliki fasa paling stabil (Maciewsky, 1993).

Beberapa contoh mineral batu kapur (Bonyton, 1980) antara lain: Kalsit (CaCO_3 , rombohedral), Aragonit (CaCO_3 , ortorombik), Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, Rombohedral), Magnesit (MgCO_3 , rombohedral). Dalam penelitian ini jenis batu kapur yang digunakan adalah dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), batu kapur dalam proses reduksi berperan dalam menyediakan gas CO_2 untuk reaksi pembentukan gas CO (reaksi Boudouard). Gas CO_2 diperoleh dengan reaksi dekomposisi dolomit pada persamaan reaksi (2.1)



Selain itu itu batu kapur bereperan sebagai *flux agent* atau pengikat pengotor. Batu kapur dapat berperan dalam proses desulfurisasi batubara melalui reaksi (2.2) pada rentang temperatur 870 hingga 1037°C (Spencer, 1985).

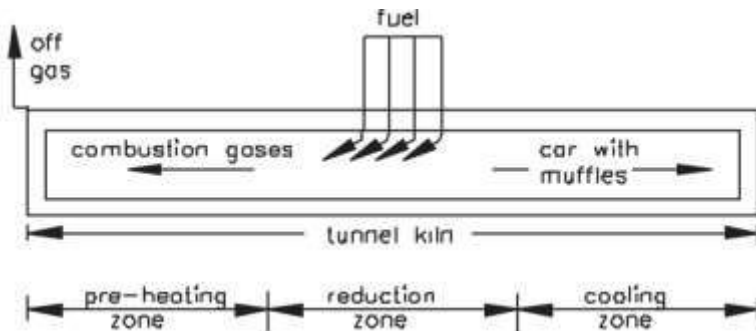




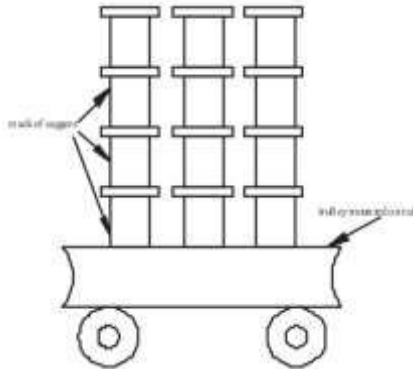
2.4 Proses Reduksi dalam Besi pada Pembuatan *Direct Reduced Iron*

Proses E. Sieurin Hoganas dikembangkan di Hoganas, Swedia pada tahun 1910, dan melibatkan reduksi *carbothermic* pada *tunnel kiln* (Ektrop, 1945). Lapisan yang terdiri dari bijih besi yang *fine-grade high-grade*, kokas, dan batu kapur dimasukkan ke dalam wadah keramik berbentuk silinder yang biasa disebut *sagger*. Susunan bahan dalam *sagger* dilakukan dengan meletakkan konsentrat bijih besi pada tengah silinder dan diantara konsentrat bijih besi dan *sagger* diisi dengan campuran kokas dan batu kapur. *Tunnel kiln* digunakan dalam proses, *sagger*, dan susunan bahan baku dalam *sagger* ditunjukkan pada Gambar 2.5; 2.6; dan 2.7 (Stephenson dan Smailer, 1980).

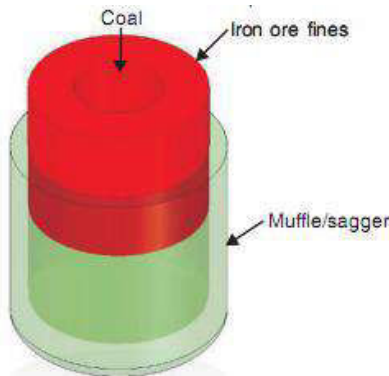
Sagger dipanaskan hingga temperatur 1260°C pada *tunnel kiln*. Furnace dipanaskan dengan gas hasil pembakaran dan karbon monoksida yang dihasilkan reduksi bijih. *Sagger* didinginkan dalam furnace, diangkat dan hasil reduksi dipisahkan. Total waktu penyimpanan *sagger* dalam *tunnel kiln* sekitar 80 jam. Kebanyakan DRI diproduksi dalam *iron powder*.



Gambar 2.5 Tunnel kiln dalam Proses Hoganas (Stephenson dan Smailer, 1980)



Gambar 2.6 Susunan Sagger pada Kereta dalam Hoganas Kiln (Stephenson dan Smailer, 1980)



Gambar 2.7 Susunan Bahan Baku pada Penampang Horizontal Sagger (Stephenson dan Smailer, 1980)

Tiga *hoganas plant* beroperasi di Oxelound, Swedia (40.000 tpa, 2 *tunnel kiln* 165 m), Swedia (65.00 tpa, 3 *tunnel kiln* 270 m) dan Riverton, New Jersey, Amerika (67.00 tpa, *tunnel kiln* 180 m). Metalisasi pada produk *hoganas* adalah 95-96%. Konsumsi bahan baku di proses ini untuk produksi 1 ton *direct reduced iron* pada Tabel 2.2.



Tabel 2.2 Konsumsi Bahan dan Energi dalam Proses *Hoganas* (Chatterjee, 2010)

Parameter	Nilai
Konsentrat bijih besi	1350 kg
Kokas	500 kg
Kapur	125-130 kg
Konsumsi Energi	15,5 GJ

2.5 *Direct Reduced Iron*

Direct reduced iron merupakan bentuk *solid state* dari reaksi reduksi langsung, selama proses reduksi langsung oksigen dihilangkan dari bijih besi dalam keadaan *solid state* untuk menghasilkan struktur *spongy* sehingga disebut dengan istilah “*sponge iron*” dengan porositas yang tinggi (Arun, 2009). Selain bentuk *solid state* dapat juga berbentuk aglomerat yang secara prinsipnya tersusun dari besi metalik, oksida besi sisa, dan pengotor sejenis fosfor, sulfur, dan pengotor (silika dan alumina). Hal ini dikarenakan pada proses pembuatannya *direct reduced iron* menggunakan bahan dasar berupa bijih besi yang berupa oksida (Magnetit, Hematit, dll) serta pengotornya. Menurut standar IS 15774: 2007 dalam praktiknya sebuah *direct reduced iron* harus memiliki derajat metalisasi lebih dari 82% dikarenakan *direct reduced iron* digunakan sebagai bahan baku dalam proses pembuatan besi dan baja, selain dari besi scrap.

Proses pembuatan *direct reduced iron* sudah ada sejak tahun 1300 M, dan merupakan sumber utama dalam pembuatan besi dan baja sebelum proses *blast furnace* ditemukan. Pembuatannya dulu memakai *hearth furnace* atau *shaft furnace*, dengan *charcoal* sebagai bahan bakar dan reduktor. Walaupun proses ini sudah ada namun masih terus digunakan sampai sekarang dengan berbagai perbaikan dan pengembangan (Faenman, 1999). Salah satu proses pembuatan *direct reduced iron* yaitu dengan proses reduksi langsung yang didefinisikan sebagai suatu proses menghasilkan besi metal dengan mereduksi



bijih besi ataupun bentuk senyawa oksida lainnya dibawah temperatur lebur setiap material yang terlibat di dalamnya (Faainman., 1999). Proses reduksi langsung disebut dengan DRI (*Direct Reduced Iron*) hasilnya masih dalam bentuk padatan dan secara fisik pada permukaannya terlihat rongga-rongga atau porositas. Gambar dari *direct reduced iron* ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Produk *Direct Reduced Iron* pada Umumnya (Khattoi, 2015)

2.6 *Electric Arc Furnace*

Electric arc furnace adalah salah satu teknologi yang umum dan populer digunakan dalam industri baja. Sumber utama panas untuk peleburan DRI atau scrap adalah busur plasma yang mencakup katoda yang dapat digerakkan dan anoda permanen yang dipisahkan dengan penumpukan tekanan gas. Mekanisme utama dalam transfer panas yang masuk adalah reaksi radiasi (Khodabandeh, 2017). Busur listrik bisa diproduksi melalui dua elektroda atau elektroda dan material cair jika tegangannya cukup tinggi. Perubahan energi listrik menjadi panas terjadi melalui arus dalam busur plasma terionisasi, di mana suhu busur plasma tersebut bisa mencapai 6000°C.

Tungku busur listrik dapat diklasifikasikan menurut proses transfer panas dari busur, yaitu melalui pemanasan tidak langsung



atau langsung. Pemanasan secara tidak langsung terjadi saat busur terbentuk antara dua elektroda tanpa kontak dengan *feed material*; panas ditransfer hanya oleh radiasi dan konveksi. Teknik ini juga digunakan dalam tungku rotari fase tunggal, yang tidak lagi digunakan karena tidak ekonomis. Dalam proses pemanasan secara langsung, busur yang terbentuk ditransfer melalui elektroda pada lelehan material. Panas ditransfer melalui konduksi, radiasi, dan konveksi (Grzella et al, 2005).

Dalam dunia industri, *electric arc furnace* adalah unit yang masuk dalam bagian pabrik baja mini yang khusus memproduksi baja dan baja tahan karat dengan aplikasi beberapa produk industri. Proses yang terjadi di unit ini dibagi menjadi beberapa tahap yaitu:

1. Persiapan dan pengisian bahan baku.
2. Peleburan dan refining dari lelehan.
3. Pengecoran logam cair ke ingot dan billet.
4. Dua input utama untuk *electric arc furnace* untuk mendapatkan diinginkan adalah bahan baku baja dan energy (Bhawan Parivesh, 2010)

Adapun proses input dan output material dengan menggunakan *electric arc furnace* pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Input dan Output Material di EAF (Bhawan Parivesh, 2010)

Input	Output
<i>Ferrous Material (Steel, scrap, swarf, foundry returns, pig iron,....)</i>	<i>Metal Alloy (steel) Dust (metal content refractory)</i>
<i>Alloying metal (ferro alloy)</i>	<i>NO_x, CO₂, CO</i>
<i>Flux (limestone,....)</i>	<i>Organic air pollutants, HC</i>
<i>Energy (electricity, gas, oil)</i>	<i>Metal oxides fumes</i>
<i>Oxygen</i>	<i>Slag (CaO, SiO₂, MgO)</i>
<i>Electrodes</i>	<i>Waste refractories</i>



Electric arc furnace juga memiliki kelebihan dalam kemampuan untuk menghasilkan produk dengan kualitas yang tinggi, pengendalian dalam hal ramah lingkungan yang baik, pengurangan dan pengoptimalan konsumsi energi listrik, rendahnya pengotor yang dihasilkan dan pengontrolan proses yang sepenuhnya canggih (Arabinda S dkk, 2011). Fleksibilitas *electric arc furnace* dapat digunakan untuk proses pembuatan baja dengan material yang berbeda, memiliki kemampuan untuk produksi dengan kualitas yang tinggi, control terhadap lingkungan yang baik, dan optimalisasi konsumsi energi listrik yang merupakan faktor kunci dalam permasalahan lingkungan (Harald, Koblenzer, 2017).

2.7 Penggunaan Arus pada *Electric Arc Furnace*

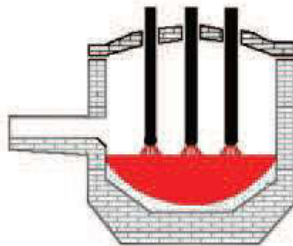
Arus pada proses peleburan dengan menggunakan *electric arc furnace* berasal dari arus searah (*direct current*) atau arus bolak-balik (*alternating current*). Dalam skala industri arus yang digunakan dalam proses peleburan yaitu menggunakan proses arus bolak-balik dengan elektroda grafit. Pada dapur busur listrik arus bolak balik, arus melewati suatu elektroda yang turun ke bahan logam melalui suatu busur listrik, kemudian arus tersebut dari bahan logam mengalir keatas melalui busur listrik menuju elektroda lainnya. Untuk peleburan baja dapat dilakukan arus satu, dua atau tiga fasa. Umumnya digunakan arus 3 fasa. (Hernandez et al., 2005).

Prinsip timbulnya panas pada tanur busur listrik adalah panas timbul akibat adanya tahanan (resistansi) saat arus listrik yang mengalir. Dalam hal ini, logam yang dimuatkan dalam tanur yang akan memberikan tahanan terhadap arus listrik. Saat logam mencair, terak akan memberikan tahanan pada aliran arus listrik. Untuk mempertahankan pemberian panas saat logam telah mencair, elektroda harus diangkat sehingga elektroda tersebut hanya menyentuh permukaan lapisan terak. Panas yang dihasilkan oleh loncatan elektron (busur api) dengan aliran listrik akan menimbulkan aliran induksi dalam cairan yang akan



menyebabkan terjadinya gerak cairan, sehingga homogenisasi cairan dapat terjadi.

Pada *arc furnace* elektroda dipakai untuk menghantarkan arus busur listrik menuju bahan peleburan, terbuat dari karbon atau grafit sebab lebih tahan terhadap temperatur tinggi. Elektroda yang digunakan, semakin lama akan semakin pendek dibagian ujung bawahnya disebabkan panas yang terjadi pada ujung tersebut. Pada saat operasi/bekerja, elektrode diturunkan secara bersama-sama hingga bersentuhan dengan logam. Elektroda yang digunakan dapat dinaikan atau diturunkan secara otomatis dengan menggunakan perangkat pengendali listrik atau hidrolik. Sistem kendali manual dan otomatis digunakan untuk menaikkan, menurunkan, dan menggeser elektroda saat proses peleburan berlangsung. Jika elektrode tersebut sudah pendek, perlu diganti yang baru. (Jones, dkk, 1998). Gambar 2.9 merupakan gambar dari EAF.



Gambar 2.9 Elektroda pada *Electric Arc Furnace*

Tungku pembuatan baja modern berukuran menengah memiliki transformator yang diberi nilai sekitar 60 MVA, dengan tegangan sekunder antara 400 dan 900 volt dan arus sekunder yang melebihi 44.000 ampere. Untuk menghasilkan satu ton baja dalam sebuah EAF membutuhkan sekitar 440 kWh per ton, jumlah minimum teoritis energi yang dibutuhkan untuk melelehkan 1000 kg baja bekas adalah 300 kWh dengan temperatur lebur sebesar 1520°C (Horia et al., 2011).



2.8 Termodinamika Pasir Besi

2.8.1 Termokimia Reaksi

Reaksi kimia selalu melibatkan pelepasan maupun penyerapan energi. Hal tersebut menunjukkan bahwa setiap material memiliki energi. Energi yang dilepaskan apabila dalam suatu reaksi produk memiliki energi yang lebih rendah daripada pereaktan, sedangkan suatu reaksi dikatakan menyerap energi apabila produk memiliki energi yang lebih tinggi daripada pereaktan (Komarudin, 2008). Ketika suatu unsur bereaksi dengan unsur lain membentuk suatu senyawa, energi panas yang digunakan pada reaksi tersebut disebut sebagai energi panas pembentukan (entalpi pembentukan) yang diberi lambang ΔH_f . Reaksi 2.3, 2.4 dan 2.5 merupakan energi panas pembentukan gas CO.



Ketika suatu senyawa bereaksi dengan senyawa lain membentuk suatu senyawa baru maka ΔH_f berubah menjadi ΔH penguraian, oleh karena itu besar ΔH_f harus dibalik. Apabila ΔH bernilai positif maka reaksi merupakan reaksi endotermik (menyerap panas). Apabila ΔH negatif maka reaksi merupakan reaksi eksotermik (melepas panas) (Komarudin, 2008).

Panas reaksi atau perubahan entalpi pada reaksi merupakan jumlah panas yang meningkat atau diserap ketika reaksi berjalan pada temperatur dan tekanan yang konstan dan perubahan entalpi dilambangkan dengan ΔH_T dengan reaksi 2.6 (Arabinda, 2011).

$$\begin{aligned} \Delta H_T &= H_{\text{produk}} - H_{\text{reaktan}} \\ &= \Delta H_{298}^0 + \left[\int_{298}^T C_p \, dT \right]_{\text{Produk}} - \left[\int_{298}^T C_p \, dT \right]_{\text{Reaktan}} \\ &= \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p \, dT \dots\dots\dots (2.6) \end{aligned}$$

2.8.2 Diagram Ellingham

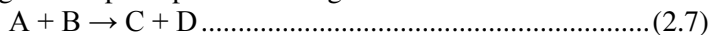
Diagram Ellingham merupakan diagram yang berisi energi bebas suatu reaksi yang diplot kedalam suatu grafik dengan



parameter energi bebas vs temperatur. Pada diagram Ellingham, logam yang aktif secara kimia memiliki energi bebas yang paling tinggi (negatif) dalam membentuk oksida terletak pada diagram yang paling bawah. Sedangkan untuk logam yang memiliki energi bebas terkecil (positif) dalam membentuk oksida terletak pada diagram di bagian paling atas. Nilai ΔG° untuk reaksi oksidasi merupakan ukuran afinitas kimia suatu logam terhadap oksigen. Semakin negatif nilai ΔG° suatu logam menunjukkan logam tersebut semakin stabil dalam bentuk oksida. Dari diagram Ellingham pada Gambar 2.10 dan 2.11 dapat diketahui temperatur minimal yang dibutuhkan agar terjadi reaksi tersebut terjadi. Hal tersebut dapat ditunjukkan oleh perpotongan antara kurva oksida dan garis pembentukan CO.

Termodinamika hanya dapat digunakan untuk menentukan apakah suatu reaksi dapat berjalan spontan atau tidak pada temperatur tertentu berdasarkan energi bebas yang dimiliki. Namun tidak dapat digunakan untuk menentukan laju reaksi. Perpotongan antara garis reaksi oksida dan reduksi secara termodinamika menunjukkan bahwa reaksi tersebut berjalan pada temperatur tertentu. Selain menggunakan diagram Ellingham, termodinamika suatu reaksi dapat ditentukan melalui perhitungan energi bebas ΔF dari reaksi 2.7 dengan menggunakan ΔF^0 referensi (Komarudin, 2008).

Energi bebas suatu reaksi juga dapat ditentukan dengan menggunakan prinsip kesetimbangan kimia :



Kecepatan reaksi pereaktan sama dengan kecepatan pereaksi produk ($V_{\text{pereaktan}} = V_{\text{produk}}$). Energi bebas dapat ditentukan dengan persamaan 2.8

$$\Delta F^0 = -RT \ln K = -RT \ln \frac{a_C \times a_D}{a_A \times a_B} \dots\dots\dots (2.8)$$

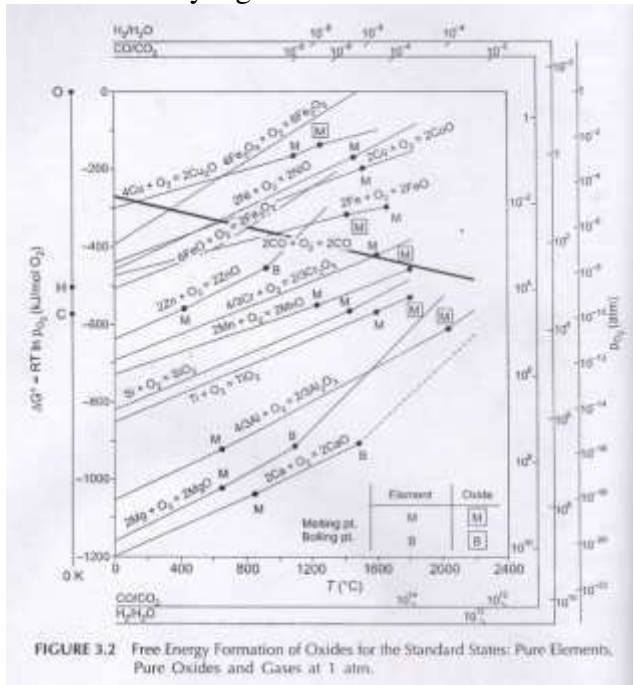
Keterangan :

- ΔF^0 = Energi bebas (cal/mol)
- R = konstanta gas
- T = Temperatur (K)



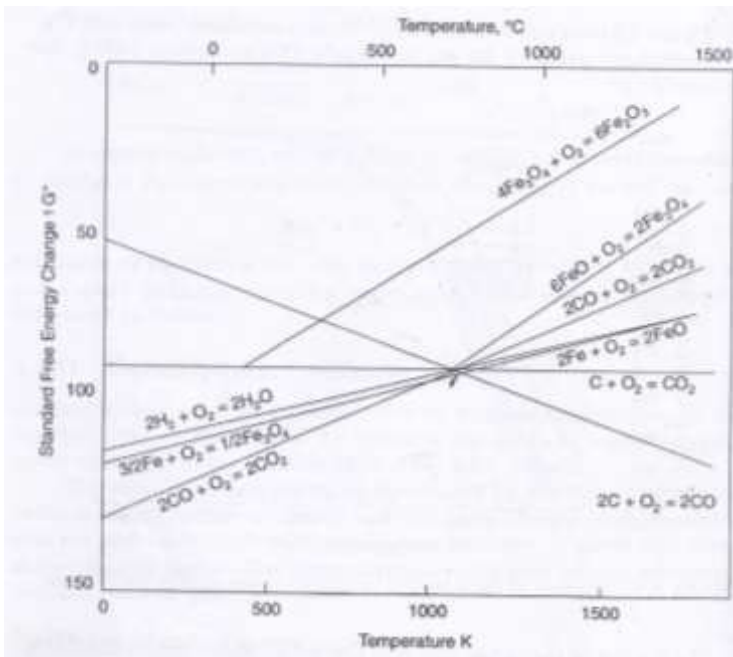
A = Aktivitas

Aktivitas pada gas sama dengan tekanan parsial yang dimiliki oleh gas tersebut. Untuk material padat dan cair, sama dengan konsentrasi yang dimiliki.



Gambar 2.10 Diagram Ellingham untuk Oksida Logam (Chatterjee, 1988)

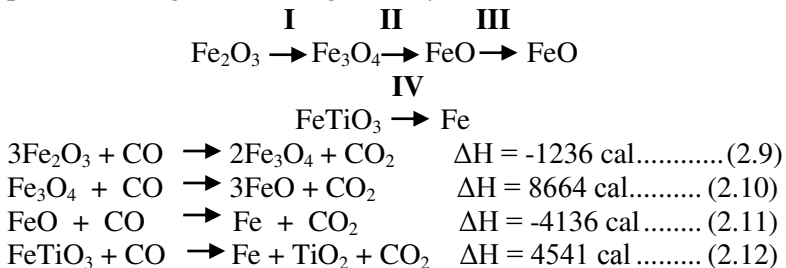
Klasifikasi reaksi reduksi bijih besi berdasarkan *reducing agent* dikemukakan oleh metallurgist Prancis bernama Jacques Assenfratz pada tahun 1812 (Chatterjee, 1988). Dia membuktikan secara pengujian bahwa reduksi bijih besi terjadi dalam 2 cara yaitu: kontak antara bijih dan arang atau interaksi dengan *reducing gas* yaitu Karbon Monoksida dan Hidrogen.



Gambar 2.11 Diagram Ellingham untuk Reduksi Besi Oksida (Chatterjee, 1988)

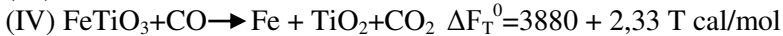
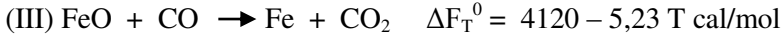
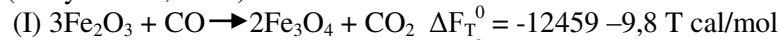
2.8.3 Tahapan Reaksi Reduksi Pasir Besi Oleh Gas CO

Ada empat tahapan reaksi reduksi pada besi oksida dalam pasir besi dengan reduktor gas CO, yakni:





Dengan menggunakan rumus energi bebas, maka persamaan diatas secara termodinamika dapat ditulis sebagai berikut (Haoyan Dkk, 2016) :



Untuk mengetahui apakah reaksi ini dapat berlangsung atau tidak pada temperatur tertentu, maka perlu menghitung nilai energi bebasnya. Seperti contoh pada persamaan (II), apabila temperatur pemanasan (T) 700 K maka nilai ΔF_T^0 akan bernilai positif. Namun apabila temperatur pemanasan (T) 973 K maka nilai ΔF_T^0 akan bernilai negatif. Arti tanda positif menunjukan bahwa reaksi tersebut tidak akan berjalan spontan atau reaksi itu berjalan namun reaksinya berkebalikan, sebaliknya jika ΔF_T^0 bernilai negatif maka reaksi tersebut akan berjalan pada temperatur tersebut. Semakin negatif nilai ΔF_T^0 maka reaksi tersebut berjalan semakin cepat (Komarudin, 2008).

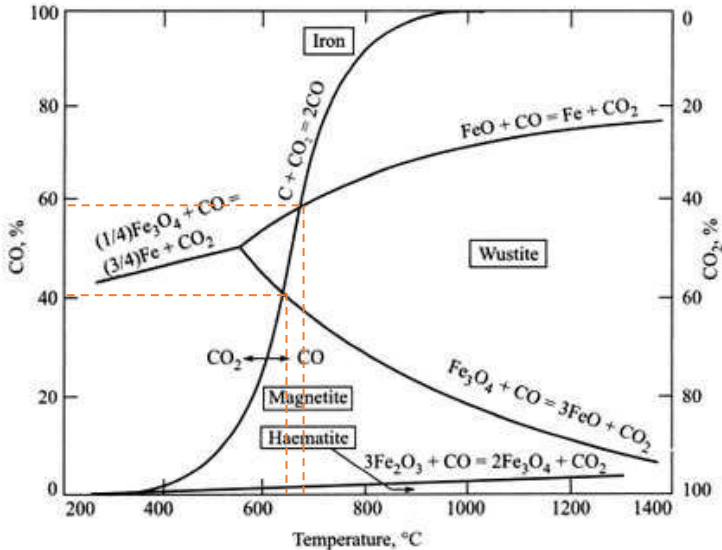
2.8.4 Diagram Boudouard – Gaussner

Gaussner – Boudouard membuat sebuah diagram yang menggambar kesetimbangan antara besi, hematit, magnetit, wustit, karbon padat, karbon monoksida, dan karbon dioksida. Diagram ini merupakan untuk reduksi langsung dengan karbon. Dari garis kesetimbangan Boudouard, pada temperatur 1000 °C terdapat 100% gas CO. Apabila temperatur diturunkan maka kesetimbangan tersebut tidak tercapai sehingga terjadi penguraian dari gas CO menjadi CO₂ dan C. Sehingga jumlah gas CO (pereduktor) akan berkurang. Pada daerah disebelah kiri garis kesetimbangan maka gas CO₂ akan lebih stabil sehingga gas CO yang ada akan terurai menjadi CO₂. Pada daerah disebelah kanan garis kesetimbangan boudouard gas CO lebih stabil sehingga gas CO₂ akan mengalami reaksi Boudouard membentuk gas CO.

Reaksi Boudouard merupakan reaksi yang bersifat endotermik sehingga membutuhkan temperatur tinggi untuk dapat



berjalan. Dari diagram Boudouard-Gaussner pada Gambar 2.12, senyawa yang terbentuk sangat dipengaruhi oleh perbandingan antara CO/CO_2 dan juga temperatur operasi.



Gambar 2.12 Diagram Gaussner - Boudouard (Arabinda dan Bidyapati, 2011)

Pada diagram di atas terdapat kesetimbangan besi oksida dengan campuran CO/CO_2 , antara lain :

1. Garis kesetimbangan Boudouard : $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$
2. Garis kesetimbangan : $3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$
3. Garis kesetimbangan : $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{FeO} + \text{CO}_2$
4. Garis kesetimbangan : $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$

Reaksi Boudouard merupakan reaksi yang bersifat endotermik sehingga membutuhkan temperatur tinggi untuk dapat berjalan.

Seperti contohnya pada temperatur 700 °C dengan perbandingan CO/CO_2 adalah 60:40, maka senyawa yang paling stabil adalah wustit (FeO). Magnetit (Fe_3O_4) akan tereduksi



menjadi wustit, sedangkan Fe akan mengalami oksidasi menjadi wustit. Hal penting yang dapat disimpulkan dari kesetimbangan boudouard antara garis kesetimbangan wustit/Fe dan garis kesetimbangan boudouard berpotongan pada temperatur 700 °C. Hal tersebut mengindikasikan bahwa temperatur minimum untuk mereduksi wustit menjadi Fe adalah 700 °C. Kemudian antara garis kesetimbangan magnetit/wustit dan garis kesetimbangan boudouard berpotongan pada temperatur 650 °C. Hal tersebut menunjukkan bahwa temperatur minimum yang dibutuhkan untuk mereduksi magnetit menjadi wustit adalah 650 °C. Temperatur minimum diatas pada tekanan 1 atm. Sangat tidak mungkin reaksi dapat berjalan dibawah temperatur minimum karena karbonmonoksida terurai menjadi karbondioksida (Komarudin, 2008).

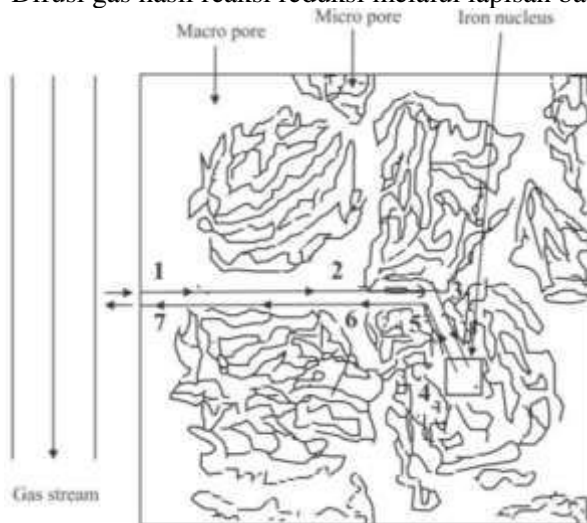
2.9 Kinetika Reduksi Besi

Kinetika reaksi reduksi bijih besi adalah kecepatan besi oksida untuk bertransformasi menjadi logam besi dengan melepaskan oksigen. Kecepatan reaksi reduksi bijih besi ditentukan oleh tinggi rendahnya kemampuan bijih besi tersebut untuk direduksi yang dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu ukuran partikel, bentuk dan distribusi ukuran partikel, bobot jenis, porositas, struktur kristal, serta komposisi kimia (El-Geassy dkk, 2007). Kinetika reduksi langsung menggunakan reduktor batu bara dipengaruhi oleh kombinasi beberapa mekanisme, yaitu perpindahan panas, perpindahan Massa oleh konveksi, difusi fase gas, serta reaksi kimia dengan gasifikasi karbon (El-Geassy dkk 2007). menjelaskan bahwa ada banyak faktor yang mempengaruhi reduksi besi oksida seperti komposisi bahan baku, basisitas, komposisi gas, dan suhu reduksi. Pengaruh komposisi gas terjadi pada perubahan volume dari besi oksida pada suhu 800-1100°C. Bijih besi dapat dianggap tersusun atas butiran-butiran. Celah diantara butiran-butiran dikenal sebagai pori makro dan pori yang lebih kecil dikenal sebagai pori mikro. Mekanisme



reduksi bijih besi bertahap melalui langkah-langkah sebagai berikut dan diilustrasikan Gambar 2.13.

1. Difusi gas reduktor melewati lapisan batas butir.
2. Difusi gas reduktor melalui pori-pori makro pada bijihbesi.
3. Difusi gas reduktor melalui pori-pori mikro menuju posisi reaksi.
4. Reaksi pada batas fasa.
5. Difusi gas hasil reaksi reduksi melalui pori-pori mikro.
6. Difusi gas hasil reaksi reduksi melalui pori-pori makro.
7. Difusi gas hasil reaksi reduksi melalui lapisan batas butir.

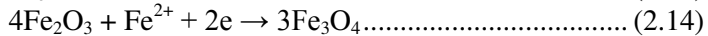
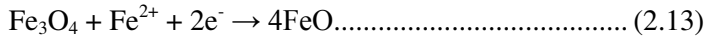


Gambar 2.13 Garis Besar Mekanisme Reduksi untuk Bijih Besi Berpori (McKewann, 1958)

Beberapa mekanisme reaksi reduksi telah diajukan dalam beberapa literatur. Mekanisme yang diajukan Edstrom untuk bijih yang dikeraskan dapat diterima. Berdasarkan Gambar 2.13 mekanisme ini mengklaim oksigen dihilangkan dari antarmuka besi-wustit. Oksida lain direduksi menjadi oksida yang lebih



rendah dengan difusi ion besi dan elektron berdasarkan reaksi 2.9 dan 2.10.



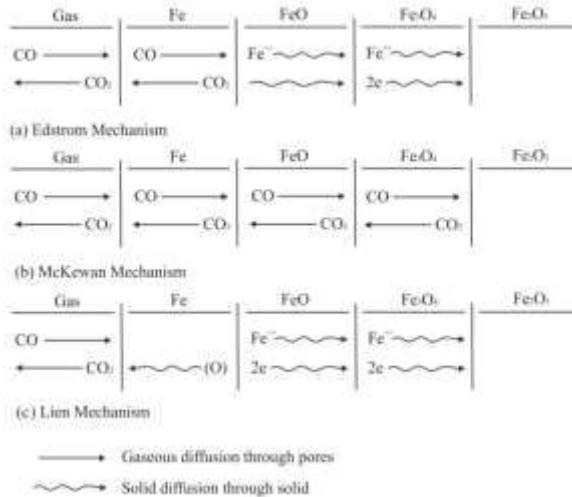
Berdasarkan mekanisme ini, oksigen dihilangkan dari besi oksida hanya pada antarmuka besi-wustit dengan reaksi gas CO atau H_2 yang masuk melalui lapisan besi dan hasil gas CO_2 atau uap air terdifusi keluar. Mekanisme kedua diusulkan McKewan pada tahun 1962 dan diaplikasikan pada bijih berpori, oksigen dihilangkan dengan gas reduktor secara keseluruhan pada semua antarmuka. Mekanisme ketiga diusul oleh Lien, El-mehairy dan Ross yang menyerupai mekanisme yang diusulkan Edstrom (Takuda, Yoshikoshi, dan Ohtano, 1973). Pada pendekatan ini C atau H_2 mereduksi wustit menjadi besi, C atau H_2 bereaksi pada permukaan lebih luar dari lapisan besi yang tidak tembus gas reduktor. Tiga mekanisme reduksi bijih besi dapat dilihat pada Gambar 2.14 dimana gasir vertikal menggambarkan antarmuka antara empat fasa.

Dari semua mekanisme reduksi, langkah-langkah yang mendasar dalam reduksi bijih besi, diantaranya (Prasetya dan Eko, 2008):

- i. Perpindahan panas dalam reaksi antarmuka
- ii. Perpindahan Massa antara gas dan permukaan padat oksida, yang meliputi difusi gas reduktor kedalam permukaan solid atau gas hasil reduksi keluar dari permukaan.
- iii. Perpindahan Massa antara permukaan oksida dan reaksi antarmuka internal melalui lapisan hasil reduksi, yang dipengaruhi oleh:
 - Difusi solid melalui oksida rendah
 - Difusi solid melalui lapisan besi metal
 - Difusi antar partikel gas reduktor atau gas hasil reduksi.
- iv. Reaksi kimia penghilangan oksigen pada permukaan antarmuka.



v. Pengintian dan pertumbuhan fasa besi metalik.



Gambar 2.14 Mekanisme Reduksi Bijih Besi (Arabinda,2011)

Faktor yang mempengaruhi kemampuan reduksi bijih besi adalah:

- Sifat besi oksida dalam bijih
- Sifat dan komposisi pengotor
- Ukuran dan bentuk bijih
- Porositas dan struktur Kristal
- Swelling
- Kecepatan linier gas
- Temperatur
- Komposisi gas
- Tekanan gas

2.10 *Pig Iron*

Pig iron merupakan salah satu produk dari industri besi. *Pig iron* memiliki kandungan karbon yang sangat tinggi, biasanya 3,5-4,5% bersama dengan silika dan senyawa lainnya yang



membuatnya sangat getas dan tidak berguna kecuali untuk aplikasi terbatas (James McIntyre dkk, 1920). Sejarah pembuatan pig iron dimulai ketika bangsa China pada dinasti Zhou Dynasty (1122-256 SM). Di Eropa proses produksi tidak ditemukan sampai akhir abad pertengahan atau sekitar tahun 1350-1500 Masehi (International Iron Metallic Association, 2017).

Pig iron dibuat dengan melelehkan bijih besi yang telah direduksi terlebih dahulu dalam *blast furnace* kemudian di proses kembali (Samuel Thomas, 2016). Ketika logam itu telah didinginkan dan telah menjadi keras, dan dapat dilepaskan dari pengotornya yang menempel disebut *pig iron* (AISE, 1999). Sampai saat ini, proses pembuatan *pig iron* biasanya menggunakan *electric arc furnace*, *induction furnace* atau *basic oxygen furnace*, di mana kelebihan karbon dibakar dan komposisi paduannya dikontrol. Gambar 2.15 merupakan gambar dari *pig iron*.



Gambar 2.15 *Pig Iron* (*id.wikipedia.org*)

2.11 Penelitian Sebelumnya

Selama ini penelitian mengenai pasir besi telah dilakukan dan masih terus dikembangkan oleh para peneliti di seluruh dunia. Seperti yang telah dilakukan oleh Anameric B. Dan S.K. Kawatra pada tahun 2004 telah mencoba mereduksi pellet magnetite campuran antara besi oksida (magnetite) dengan batubara, limestone dan bentonit dengan variabel massa berturut-turut sebanyak 71,84 : 20,00 : 7,50 : 0,66. Pellet pada penelitian ini dibakar dengan *furnace* sampai temperatur 1450°C selama 22



menit yang menghasilkan *pig iron* dengan kadar Fe mencapai 96,46%. Namun, pada penelitian ini hanya berskala laboratorium saja.

Pada tahun 2012 Yongli dan teman-temannya melakukan analisa terhadap penambahan batubara dalam bijih besi (inner coal) pada proses tunnel kiln. Bijih yang digunakan berupa hematit yang mempunyai kadar Fe awal sebesar 43,58%, SiO_2 22,2%, Al_2O_3 6,99% dan batubara dengan fixed carbon sebesar 45,91%, ash 47,12% dan volatile matter 6,79%. Proses reduksi ini dilakukan dengan temperatur 1150°C dan campuran bahan melewati tunnel kiln dengan tahapan preheat selama 12 jam, holding 12 jam dan cooling 25 jam. Setelah proses reduksi, produk dihancurkan hingga <4 mm, dan dilakukan operasi magnetik. Ketika batubara yang ditambahkan semakin banyak dari 0% hingga 15%, maka kadar Fe menurun dari 94,94% hingga 88,81% dan *recovery* Fe meningkat dari 55,94% menjadi 92,94%.

Pada tahun 2016 Hairul Wasik melakukan penelitian mengenai pembuatan *direct reduced iron* dengan variasi jenis arang pada briket pasir besi yaitu batubara, tempurung kelapa, kayu asem dan kayu laban. Briket yang telah dibuat, dipanaskan menggunakan *muffle furnace* sampai temperatur 950°C selama 3 jam kemudian di holding pada temperatur 1350°C selama 10 jam setelah itu didinginkan selama 12 jam di dalam *muffle furnace*. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa penggunaan reduktor batubara yang paling optimal dengan kadar Fe total dari *direct reduced iron* yaitu sebesar 79,0675% .

Selanjutnya, Adil Jamali pada tahun 2005 melakukan penelitian mengenai pengolahan pasir besi titan menjadi hot metal dengan tungku induksi listrik. Pada penelitian ini, pasir besi titan dibentuk pellet komposit dengan mencampurkan batubara dan bentonit. Kemudian direduksi dengan tungku low shaft yang menghasilkan *direct reduced iron* dengan kandungan Fe mencapai 80%. Setelah mendapatkan *direct reduced iron*, dilakukan peleburan di tungku induksi dengan kapasitas 500 kg.



Dengan masing-masing daya sebesar 190, 230, 250, 270 kW dan berat umpan sebanyak 300 kg yang berasal dari *direct reduced iron* hasil reduksi pellet komposit dan besi scrap. *Pig iron* yang didapat mengandung 93,9% Fe.

Pada tahun 2016, oleh Kusno Isnugroho dan David C. Birawidha melakukan penelitian terhadap limbah pasir besi yang berasal dari crushing plant yang berlokasi di Lampung Selatan. Diketahui bahwa limbah pasir besi tersebut memiliki kadar Fe sebesar 54,99%. Setelah dilakukan washing, kadar Fe meningkat menjadi 58,09%. Kemudian setelah dilakukan magnetic separation, kadar Fe meningkat lagi menjadi 60,57% yang mana nilai ini telah mencukupi kadar Fe minimum untuk digunakan dalam proses reduksi bijih besi menggunakan hot blast furnace cupola. Pada penelitian ini temperatur untuk melebur pellet komposit sebanyak 480 kg dan scrap sebanyak 403 kg sebesar 1520°C sampai 1670°C. *Pig iron* yang dihasilkan sebanyak 762,87 kg dengan kandungan Fe sebesar 93,62%.

Penelitian yang dilakukan oleh Nuryadi Saleh dan Siti Rochani pada tahun 2015, telah melakukan penelitian terhadap peleburan *direct reduced iron*. Pada penelitian ini *direct reduced iron* dicampurkan dengan sejumlah fluks CaCO_3 dan pasir kuarsa. Kemudian campuran spons besi dan kapur serta sedikit batubara diumpankan terhadap resistance furnace. Proses reduksi dilakukan pada temperatur 1600°C, selama 1-2 jam. Produk yang dihasilkan adalah *pig iron* serta slag yang dianalisa komposisi kimianya. *Pig iron* yang dihasilkan mengandung Fe sebesar 95,79%.

Kemudian pada tahun 2013 Imam bersama dengan teman-temannya membuat rancangan mengenai tungku busur listrik satu fasa dengan diameter dalam dapur sebesar 150 mm dan tinggi 200 mm yang memiliki kapasitas 5-10 kg yang dapat digunakan untuk proses peleburan. Pada rancangan ini, dilakukan peleburan ferromangan dengan komposisi bahan sebanyak 6000 gr bijih mangan dan 560 gr bijih besi. Peforma dari hasil rancang tungku busur listrik ini pada temperatur 1700°C dengan arus sebesar 350



A dan waktu operasi selama 120 menit. Tungku busur listrik hasil rancang bangun akan membutuhkan waktu proses lebih cepat ketika arus yang digunakan bertambah dan temperatur leleh dari bahan baku relatif tidak begitu tinggi.

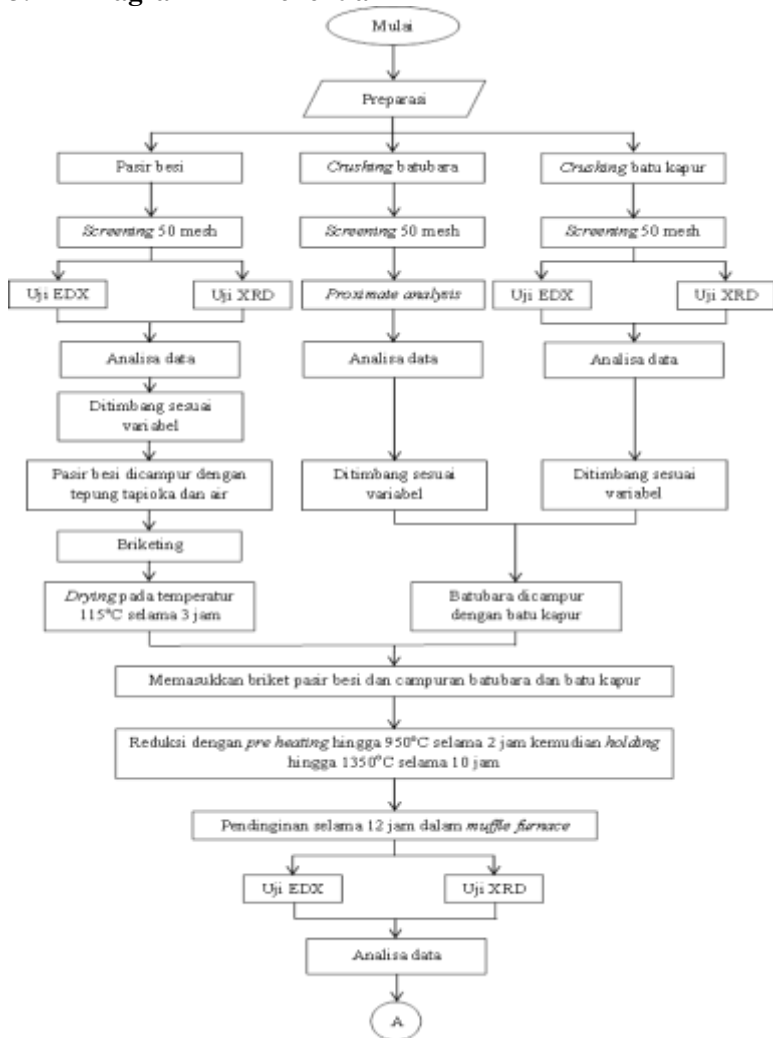
Berdasarkan buku *fundamental electric arc furnace* oleh Eugene Pretorius dan Helmut Oltmann tahun 1998 telah dilakukan peleburan scrap dengan menggunakan *electric arc furnace* dengan energi sekitar 380-400 kWh untuk setiap ton dengan waktu yang dibutuhkan kurang dari 60 menit dan temperatur yang dapat tercapai sebesar 1430°C. Pada buku ini hasil dari peleburan *scrap* sebanyak 1000 kg menghasilkan *pig iron* dengan kandungan Fe sebesar 95,7%.

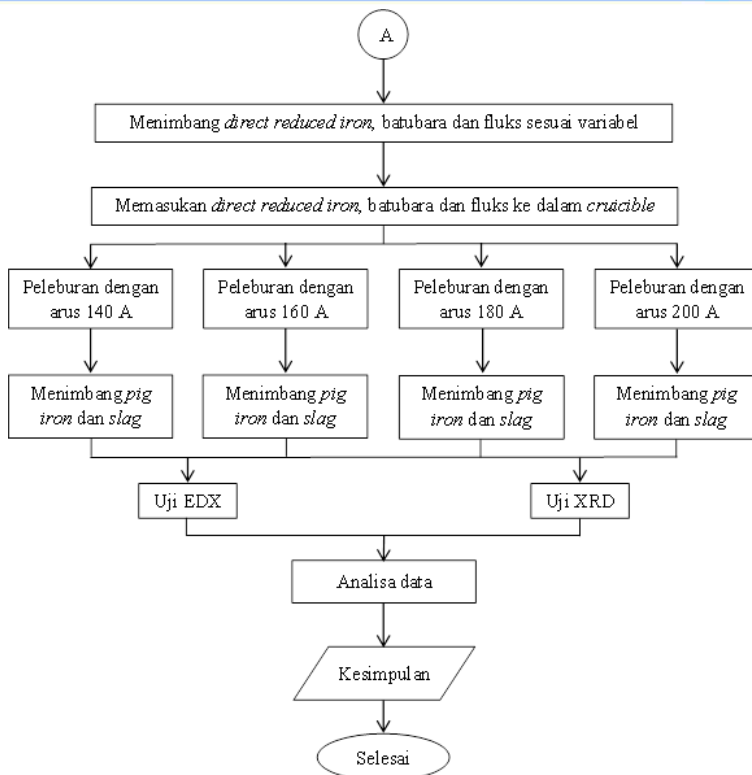


(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain:

3.2.1 Pasir Besi

Pasir besi seperti pada Gambar 3.2 yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir besi yang berasal dari daerah Sukabumi, Jawa Barat. Pasir besi di *screening* terlebih dahulu hingga ukuran 50 mesh.



Gambar 3.2 Pasir Besi

3.2.2 Batubara

Batubara yang digunakan dalam penelitian ini yaitu batu bara dengan jenis sub-bituminus dari Binuang, Kalimantan Selatan. Batubara ini juga dihancurkan terlebih dahulu kemudian diayak hingga berukuran 50 mesh. Batu bara yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Batubara

3.2.3 Batu Kapur

Batu Kapur (Dolomite) yang digunakan dihancurkan terlebih dahulu kemudian diayak hingga berukuran 50 mesh. Batu kapur yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Batu Kapur

3.2.4 Tepung Tapioka

Tepung tapioka seperti Gambar 3.5 digunakan sebagai pengikat (binder) dalam pembuatan briket yang sebelumnya dicampurkan air dan dipanaskan menjadi kanji.



Gambar 3.5 Tepung Tapioka

3.2.5 Air

Air digunakan dalam pembuatan briket. Air yang digunakan yaitu air ledeng.



3.2.6 LPG

LPG digunakan dalam penelitian sebagai sumber bahan bakar yang digunakan dalam *muffle furnace*. LPG yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 LPG

3.2.7 Fluks

Fluks SiO_2 seperti Gambar 3.7 digunakan sebagai pengikat impuritas yang masih ada dalam *direct reduced iron*.



Gambar 3.7 Fluks SiO_2



3.2.8 Elektroda Grafit

Elektroda grafit seperti pada Gambar 3.8 berfungsi sebagai bahan yang mengalirkan arus listrik dengan cepat. Dua elektroda disambung satu dengan lainnya untuk menghasilkan busur api. Elektroda memiliki dimensi sebagai berikut

Diameter	: 10 mm
Panjang	: 300 mm



Gambar 3.8 Elektroda Grafit

3.3 Peralatan Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan beberapa peralatan, antara lain:

3.3.1 Sagger

Sagger seperti pada Gambar 3.9 merupakan tempat berlangsungnya proses reduksi yang berbentuk silinder. Sagger terbuat dari Silika Karbida (SiC) dengan dimensi sebagai berikut:

Diameter dalam	: 110 mm
Diameter luar	: 121 mm
Tinggi bagian luar	: 141 mm
Tinggi bagian dalam	: 126 mm
Tebal dinding Sagger	: 11 mm



Gambar 3.9 Sagger

3.3.2 Alat Kompaksi

Alat kompaksi seperti pada Gambar 3.10 digunakan untuk proses pembentukan briket pasir besi menjadi berbentuk bantalan.



Gambar 3.10 Alat Kompaksi

3.3.3 Muffle Furnace

Muffle furnace seperti pada Gambar 3.11 merupakan tungku yang digunakan untuk proses reduksi pasir besi menjadi *direct reduced iron*. Dimensi *muffle furnace* yang digunakan adalah sebagai berikut:

Diameter dalam	: 280 mm
Diameter luar	: 320 mm
Tinggi bagian luar	: 400 mm
Tinggi bagian dalam	: 360 mm
Tebal batu tahan api	: 50 mm



Gambar 3.11 *Muffle Furnace*

3.3.4 Timbangan Digital

Timbangan digital digunakan dalam penelitian ini untuk menimbang bahan baku yang akan digunakan sebagai bahan campuran untuk pembuatan briket, ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Timbangan Digital

3.3.5 Ayakan

Ayakan digunakan dalam penelitian ini untuk mendapatkan ukuran butir dari bahan baku yang digunakan sebagai bahan campuran pembuatan briket. Ayakan yang digunakan berukuran 50 mesh seperti pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Ayakan

3.3.6 Thermocouple

Thermocouple seperti pada Gambar 3.14 digunakan untuk mengetahui temperatur di dalam *muffle furnace* saat proses aglomerasi.



Gambar 3.14 Thermocouple

3.3.7 Blower

Blower digunakan untuk meniupkan udara luar ke dalam *muffle furnace*. *Blower* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15 *Blower*

3.3.8 *Oven*

Oven digunakan untuk mengeringkan briket hasil kompaksi untuk menghilangkan *moisture content*. *Oven* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.16.



Gambar 3.16 *Oven*

3.3.9 *Alat Tumbuk*

Alat tumbuk pada Gambar 3.17 digunakan untuk menghancurkan bahan baku yang digunakan agar mendapatkan ukuran butir bahan baku yang sesuai, yaitu 50 mesh.



Gambar 3.17 Alat Tumbuk

3.3.10 Power Supply

Power supply seperti pada Gambar 3.18 merupakan alat penyuplai energi listrik yang merupakan sumber energi dalam *electric arc furnace*. Spesifikasi *power supply* yang digunakan adalah:

- TIG/MMA Welder
- Tegangan sebesar 16,2 V
- Arus maksimal sebesar 220 A



Gambar 3.18 *Power Supply*



3.3.11 *Crucible*

Crucible seperti Gambar 3.19 merupakan tempat berlangsungnya proses peleburan *direct reduced iron* menjadi *pig iron*. *Crucible* yang digunakan terbuat dari silika karbida (SiC) dengan dimensi sebagai berikut:

Panjang luar	: 118 mm
Panjang dalam	: 85 mm
Lebar luar	: 75 mm
Lebar dalam	: 50 mm
Tinggi luar	: 60 mm
Tinggi dalam	: 45 mm



Gambar 3.19 *Crucible*

3.4 Pelaksanaan Penelitian

3.4.1 Persiapan Material

Langkah-langkah yang dilakukan pada proses preparasi material yaitu:

1. Menumbuk pasir besi, batubara, dan batu kapur dan kemudian mengayak hingga ≤ 50 mesh.
2. Menguji pasir besi menggunakan alat uji EDX dan XRD.
3. Menguji batukapur dengan EDX.
4. Menguji batubara dengan Proximate Analysis.



5. Membuat briket pasir besi.

Pasir besi hasil ayakan ditimbang dengan berat 50 gram. Pasir besi dicampur dengan tepung tapioka sebanyak 5 gram yang sebelumnya tepung tapioka dicampur dengan air mendidih seberat 5 gram. Perbandingan pasir besi: tepung tapioka: air, 10 : 1: 1. Campuran pasir besi, tepung tapioka, dan air dibentuk menjadi briket bantalan dengan dikompaksi seperti Gambar 3.20. Dalam satu kali proses reduksi dibutuhkan 4 buah briket dengan berat 200 gram pasir besi.

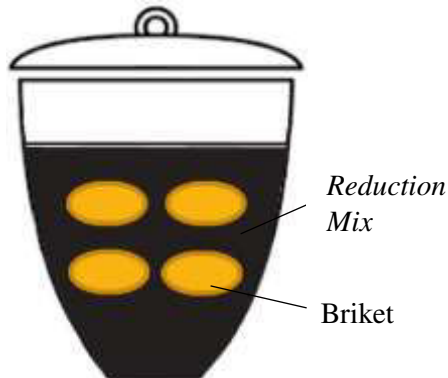


Gambar 3.20 Briket *Pillow* Pasir Besi

6. Pembuatan campuran batubara dan batu kapur.

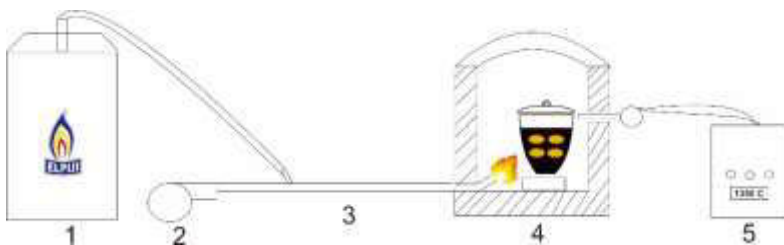
Batu bara dan batu kapur hasil ayakan ditimbang dengan berat sesuai perhitungan stoikiometri yaitu dengan perbandingan pasir besi : batubara : batu kapur adalah 1 : 0,44 : 0,62

7. Briket pasir besi dicampur dengan batu bara dan batu kapur kemudian dimasukkan kedalam crucible dengan susunan seperti pada Gambar 3.21



Gambar 3.21 Susunan Briket dan *Reduction Mix*

8. *Crucible* kemudian dimasukan kedalam *muffle gas furnace* untuk dipanaskan. Panas yang dihasilkan berasal pembakaran gas LPG yang dihembuskan dengan udara bertekanan yang berasal dari *blower* dengan susunan alat seperti pada Gambar 3.22.



Gambar 3.22 Susunan Peralatan 1) gas LPG, 2) blower, 3) pipa burner, 4) *muffle gas furnace*, 5) *thermocouple*

3.4.2 Proses Reduksi

Langkah-langkah yang dilakukan pada proses pereduksian pasir besi yaitu :

1. *Sagger* yang berisi bahan baku dimasukkan dalam *muffle furnace*.



2. Pemanasan *sagger* dilakukan *pre-heating* pada temperatur 900°C selama 2 jam dan dilakukan *holding* pada temperatur 1350°C selama 10 jam.
3. Sampel didinginkan didalam *muffle furnace* selama 12 jam.
4. Setelah proses ekstraksi selesai, sampel dikeluarkan dari *muffle furnace*. Hasil ekstraksi dikeluarkan dari *sagger*, selanjutnya akan dilakukan proses pengujian EDX dan XRD.

3.4.3 Persiapan Proses *Smelting*

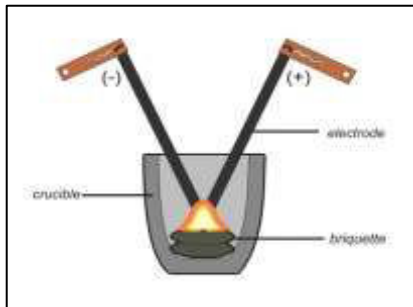
Langkah-langkah yang dilakukan pada proses peleburan *direct reduced iron* menjadi *pig iron* yaitu :

1. Menimbang massa *direct reduced iron* setelah mengalami proses reduksi.
2. Menimbang massa batubara dan fluks SiO_2 dengan perbandingan *direct reduced iron* : batubara : fluks 1 : 0,115 : 0,028 dari perhitungan stoikiometri.
3. Memasukkan *direct reduced iron* hasil reduksi ke dalam *crucible* dan mencampurnya dengan batubara dan fluks sesuai perbandingan berat.

3.4.4 Proses *Smelting*

Langkah-langkah yang dilakukan pada proses peleburan *direct reduction iron* yaitu :

1. *Direct reduced iron* yang telah ditambahkan batubara dan fluks, dimasukkan ke dalam *crucible* dan diposisikan bertempuk serta berada di tengah-tengah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.23.



Gambar 3.23 Skematik Preparasi Proses *Smelting* dengan *Electric Arc Furnace*

2. Pemanasan dilakukan dengan membentuk busur listrik menggunakan 2 elektroda grafit yang didekatkan ujungnya satu sama lain, berikut dengan *setting power supply* pada tegangan tetap sebesar 16,2V dan waktu tetap 6 menit.
3. Proses yang terjadi awal pemanasan bertujuan untuk melebur *direct reduced iron* dan fluks yang perlahan-lahan keduanya melebur di waktu menit ke-2, kemudian dilakukan *treatment* untuk *homogenizing* dengan meratakan pemanasan dengan busur listrik di seluruh permukaan *direct reduced iron* yang telah mencair tersebut untuk pemisahan fisik antara *slag* dengan *pig iron* berjalan sempurna.
4. Produk hasil didinginkan di dalam *crucible* hingga mencapai temperatur kamar.
5. Setelah proses peleburan selesai, produk hasil dikeluarkan dari *crucible*.
6. Dilakukan pemisahan fisik antara *slag* dengan *pig iron* dengan menggunakan palu. *Slag* akan pecah dan dapat dipisahkan sehingga menyisakan massa *pig iron*. Logam yang sudah terpisah tersebut kemudian dibersihkan dan ditimbang massa *pig iron* dan *slag* untuk selanjutnya dilakukan proses pengujian EDX dan XRD.



3.5 Pengujian Penelitian

Pada penelitian ini akan dilakukan beberapa pengujian untuk mendapatkan data yang sesuai dengan tujuan dari penelitian. Pengujian antara lain:

3.5.1 X-Ray Diffraction (XRD)

Untuk mengetahui struktur kristal dan senyawa secara kualitatif yang terdapat pada bahan baku yang digunakan diuji dengan alat XRD seperti pada gambar 3.24. Dalam pengujian XRD sampel yang akan diuji sebelumnya harus sudah dihancurkan terlebih dahulu hingga berukuran 200 mesh. Sinar X merupakan radiasi elektromagnetik yang memiliki energi tinggi sekitar 200 eV hingga 1 MeV. Sinar X dihasilkan oleh interaksi antara berkas elektron eksternal dengan elektron pada kulit atom. Spektrum sinar X memiliki panjang gelombang $10^{-1} - 10$ nm, berfrekuensi 1017 – 1020 Hz dan memiliki energi $10^3 - 10^6$ eV. Panjang gelombang sinar X memiliki orde yang sama dengan jarak antar atom sehingga dapat digunakan sebagai sumber difraksi kristal. XRD digunakan untuk menentukan ukuran kristal, regangan kisi, komposisi kimia, dan keadaan lain yang memiliki orde sama.



Gambar 3.24 XRD *PAN Analytical*



3.5.2 *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX)*

Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy atau EDX seperti gambar 3.25 adalah suatu teknik yang digunakan untuk menganalisa elemen atau karakterisasi kimia dari suatu sampel. Prinsip kerja dari alat ini adalah metode spektroskopi, dimana elektron ditembakkan pada permukaan sampel, yang kemudian akan memancarkan *X-Ray*. Energi tiap – tiap photon *X-Ray* menunjukkan karakteristik masing – masing unsur yang akan ditangkap oleh detektor EDX, kemudian secara otomatis akan menunjukkan puncak–puncak dalam distribusi energi sesuai dengan unsur yang terdeteksi. Hasil yang didapatkan dari pengujian EDX adalah berupa grafik *energy (KeV)* dengan *counts*. Dari data grafik tersebut kita bisa melihat unsur – unsur apa saja yang terkandung di dalam suatu sampel. Serta dengan pengujian EDX, didapatkan pula persentase dari suatu unsur yang terkandung di dalam suatu sampel.



Gambar 3.25 EDX



3.5.3 Proximate Analysis

Untuk mengetahui kandungan batu bara seperti kadar *moisture*, *volatile matter*, *ash*, dan *fixed carbon* dapat dilakukan pengujian *proximate analysis*. Standar pengujian yang dilakukan yaitu ASTM D 3172-02 (*Fixed Carbon*), ASTM D 3173-02 (*Moisture*), ASTM D 3174-02 (*Ash*), dan ASTM D 3175-02 (*Volatile matter*).

3.5.3.1 Moisture

Analisa kadar *moisture* dalam batu bara dilakukan dengan metode ASTM D 3173-02. Sampel yang digunakan dihaluskan hingga 250 μm .

Bahan :

1. Udara kering
2. Pengering, seperti kalsium sulfat anhidrat (0,004 mg/L), silika gel, magnesium perklorat (0,0005 mg/L), dan asam sulfat (0,003 mg/L)

Alat :

1. Oven Pengering

Prosedur

1. Mengeringkan sampel dalam pengering selama 15 menit hingga 30 menit dan ditimbang. Mengambil sampel seberat 1 g dan diletakkan dalam kapsul, tutup kapsul dan timbang.
2. Meletakkan kapsul dalam oven yang telah dipanaskan ($104^{\circ}\text{C} - 110^{\circ}\text{C}$). Tutup oven dan panaskan selama 1 jam. Buka oven dan dinginkan dengan pengering. Timbang segera kapsul bila telah mencapai temperatur ruangan.

1. Menghitung hasil analisa.

Perhitungan

$$\text{Moisture, \%} = [(A - B) / A] \times 100 \dots\dots\dots (3.1)$$

Dimana,

A = berat sampel yang digunakan (gram)

B = berat sampel setelah pemanasan (gram)



3.5.3.2 *Volatile Matter*

Analisa kadar *volatile matter* dalam batu bara dilakukan dengan standar ASTM D 3175-02. Sampel yang digunakan dihaluskan hingga 250 μm .

Alat

1. Krusibel platina dengan tutup, untuk batu bara berkapasitas 10 – 20 mL, diameter 25 – 35 mm. Dan tinggi 30 – 35 mm.
2. *Vertical electric tube furnace*.

Prosedur

1. Menimbang sampel seberat 1 g dalam krusibel platina, tutup krusibel dan masukkan dalam *furnace*, temperatur dijaga $950 \pm 20^\circ\text{C}$.
2. Setelah *volatile matter* lepas, yang ditunjukkan dengan hilangnya api *luminous*, periksa tutup krusibel masih tertutup.
3. Setelah pemanasan tepat 7 menit, pindahkan krusibel keluar *furnace* dan didinginkan.
4. Timbang ketika dingin
5. Presentasi *weight loss* dikurangi presentasi *moisture* sama dengan *volatile matter*.

Perhitungan

$$\text{Weight Loss, \%} = [(A - B) / A] \times 100 \dots\dots\dots (3.2)$$

Dimana,

A = berat sampel yang digunakan (gram)

B = berat sampel setelah pemanasan (gram)

Kemudian persen *volatile matter* dihitung

$$\text{Volatile Matter, \%} = C - D \dots\dots\dots (3.3)$$

Dimana,

C = *Weight Loss* (%)

D = *Moisture* (%)

3.5.3.3 *Ash*

Analisa kadar *ash* dalam batu bara dilakukan dengan standar ASTM D 3174-02. Sampel yang digunakan dihaluskan hingga 250 μm .



Alat

1. *Electric muffle furnace*
2. Kapsul porselen atau krusibel platina
3. Tutup krusibel

Prosedur

1. Memasukkan 1 g sampel dalam kapsul dan ditimbang dan tutup. Letakkan kapsul dalam *furnace* dingin. Panaskan dengan temperatur 450 – 500 °C selama 1 jam.
2. Memanaskan sampel hingga temperatur mencapai 700–750°C selama 1 jam. Kemudian lanjutkan pemanasan hingga 2 jam.
3. Pindahkan kapsul keluar dari *furnace*, didinginkan dan timbang.

Perhitungan

$$\text{Ash, \%} = [(A - B) / C] \times 100 \dots\dots\dots(3.4)$$

Dimana,

A = berat kapsul, tutup, dan *ash* (gram)

B = berat kapsul kosong dan tutup (gram)

C = berat sampel yang digunakan (gram)

3.5.3.4 *Fixed Carbon*

Analisa kadar *fixed carbon* dalam batu bara dilakukan dengan standar ASTM D 3172-02 dengan perhitungan dari data kadar *moisture*, *ash*, dan *volatile matter*.

Fixed Carbon,

$$\% = 100\% - [\text{moistur} (\%) + \text{as} (\%) + \text{volatile matte} (\%)] \dots\dots\dots(3.6)$$

3.5.4 *Recovery Fe*

Recovery Fe dapat didefinisikan sebagai persentase Fe yang terdapat pada massa akhir dari proses perduksian hingga peleburan, *recovery Fe* dapat dihitung menggunakan persamaan 3.7.

$$\text{Recovery Fe} = \frac{\text{massa akhir Fe} \times \text{kadar akhir Fe}}{\text{massa awal Fe} \times \text{kadar awal Fe}} \times 100\% \dots\dots(3.7)$$



Dimana:

- Massa akhir Fe = massa dari Fe yang terdapat pada *pig iron* (gram)
- Kadar akhir Fe = kadar dari Fe yang terdapat pada *pig iron* (%)
- Massa awal Fe = massa dari Fe yang terdapat pada *direct reduced iron* (gram)
- Kadar awal Fe = kadar dari Fe yang terdapat pada *direct reduced iron* (%).

3.6 Rancangan Penelitian

3.6.1 Rancangan Penelitian Pembuatan *Direct Reduced Iron*

Berikut adalah rancangan penelitian yang dilakukan untuk proses reduksi mendapatkan *direct reduced iron* sesuai dengan perhitungan stoikiometri.

Tabel 3.1 Rancangan Penelitian Pembuatan *Direct Reduced Iron*

Pasir besi	Batubara	Batu kapur	Hasil pengujian	
			EDX	XRD
1	0,44	0,62		

3.6.2 Rancangan Penelitian Pembuatan *Pig Iron*

Berikut adalah rancangan penelitian yang dilakukan untuk proses peleburan *direct reduced iron* mendapatkan *pig iron* sesuai dengan perhitungan stoikiometri dengan tegangan sebesar 16,2 V dan waktu selama 6 menit.



Tabel 3.2 Rancangan Penelitian Pembuatan *Pig Iron*

Perbandingan massa (gr)			Arus (A)	Hasil pengujian		
<i>DRI</i>	Batu bara	Fluks		EDX	XRD	<i>Recovery Fe</i>
1	0,115	0,028	140			
			160			
			180			
			200			



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Bahan Penelitian

Pada penelitian ini bahan yang digunakan yaitu pasir besi, batu kapur dan batubara. Untuk mengetahui karakterisasi terhadap bahan yang digunakan dalam penelitian dilakukan beberapa pengujian.

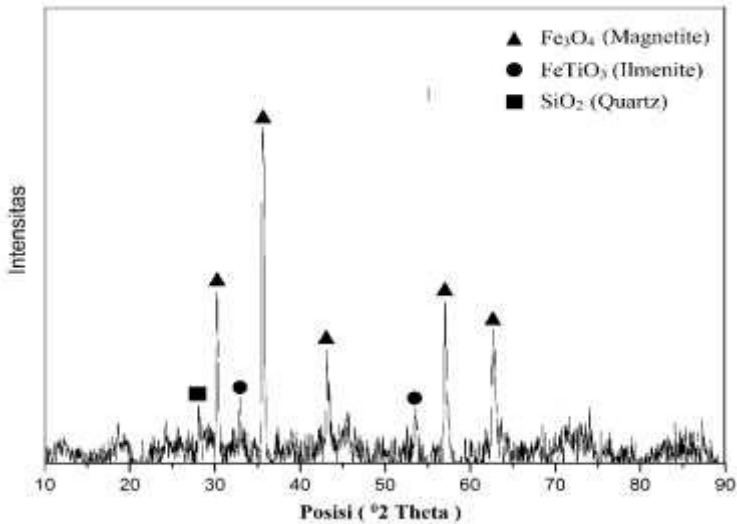
4.1.1 Pasir Besi

Identifikasi dari pasir besi dimulai dengan identifikasi unsur dengan pengujian EDX. Pengujian EDX dilakukan dengan alat SEM PANalytical milik Departemen Teknik Material ITS. Hasil pengujian EDX dari pasir besi bisa dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian EDX Konsentrat Pasir Besi

Parameter	Fe	Si	Mg	O	Ti	Al
%Wt	57,93	3,14	2,72	24,4	8,46	2,66

Pada Tabel 4.1 hasil pengujian EDX, kadar besi dalam pasir besi masih cukup rendah yaitu 57.93% dan masih banyak unsur seperti silikon, magnesium, oksida, titanium dan aluminium. Setelah mengetahui kandungan Unsur-unsur yang dominan dalam konsentrat pasir besi dilanjutkan dengan identifikasi fasa pasir besi dengan menggunakan pengujian XRD, dengan menggunakan mesin XRD PANalytical X'Pert. Pengujian dilakukan dengan posisi 2θ 100 sampai 900 dan menggunakan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar 1.54056 \AA . Pasir besi yang digunakan berupa konsentrat dan berasal dari Sukabumi, yang telah diayak dengan ayakan 50 mesh atau $397 \mu\text{m}$. Selanjutnya puncak-puncak dicocokkan dengan kartu dari software PDF-2 Release 2011. Hasil pengujian XRD pasir besi dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik XRD Pasir Besi Sukabumi

Dari hasil pengujian XRD yang ditunjukkan oleh Gambar 4.1 dapat diketahui fasa dominan yang terdapat pada pasir besi berupa magnetit (Fe_3O_4). Selain itu juga terdapat fasa maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), ilmenit (FeTiO_3), dan silika (SiO_2).

4.1.2 Batubara

Batubara yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Binuang, Kalimantan Selatan. Batubara berperan penting menyediakan karbon dalam bertindak sebagai reduktor (gas CO hasil gasifikasi batubara) yang mereduksi Fe_2O_3 menjadi Fe dan FeTiO_3 menjadi Fe.

Pengujian *proximate analysis* merupakan pengujian yang sangat penting untuk menentukan kadar *moisture*, *ash*, *volatile matter*, dan *fixed carbon*. Pengujian *proximate* dilakukan berdasarkan standar ASTM D 3173-02. Hasil pengujian *proximate analysis* batubara yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.2.



Tabel 4.2 Hasil Pengujian *Proximate Analysis* Batubara

Parameter	Hasil	Unit	Standar Pengujian
Kelembapan Total (<i>Moisture</i>)	1,8	%, ar	ASTM D3302-02
Kadar Abu (<i>Ash</i>)	4,75	%, ar	ASTM D3174-02
Kadar Karbon Tetap (<i>Fixed Carbon</i>)	42,35	%, adb	ASTM D3175-02
Kadar Zat yang mudah menguap (<i>Volatile Matter</i>)	52,86	%, adb	ASTM D3172-02
Nilai Kalori	7204	Cal/gr, adb	ASTM D5865-03

Dari Tabel 4.2 batubara ini memiliki nilai kalori yang cukup tinggi, yaitu 7204 kal/gr dan kadar karbon 42,35 %. Sehingga dapat dikategorikan sebagai batu bara golongan *sub-bituminus*. Hasil dari analisa proksimat di atas digunakan untuk perhitungan neraca massa yang digunakan untuk menghitung kebutuhan pembuatan *direct reduced iron* dan *pig iron*.

4.1.3 Dolomit

Identifikasi dari dolomit dimulai dengan identifikasi unsur dengan pengujian EDX. Pengujian EDX dilakukan dengan alat SEM *PANalytical* milik Departemen Teknik Material ITS. Hasil pengujian EDX dari dolomit bisa dilihat pada Tabel 4.3.

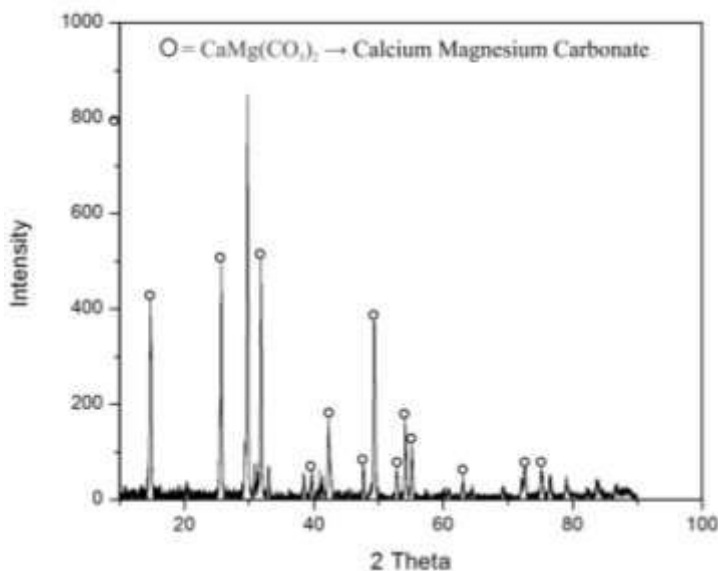
Tabel 4.3 Hasil Pengujian EDX Dolomit

No.	Elemen	Rumus Kimia	Komposisi (%)
1.	Kalsium	Ca	18.015
2.	Magnesium	Mg	14.30
3.	Karbon	C	12.6215
4.	Oksigen	O	55.0635



Dari pengujian EDX pada Tabel 4.3 bahwa batu kapur memiliki kandungan Mg yang cukup tinggi, yaitu 14.30 %. Dari kandungan Mg tersebut dapat disimpulkan bahwa kapur yang digunakan ialah *dolostone* atau dolomit bukan *limestone*. Dari segi proses aglomerasi, baik Mg maupun Ca yang membentuk senyawa $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ akan membantu proses dengan cara menyediakan gas CO_2 untuk penyediaan gas reduktor proses reduksi dan sebagai *flux agent* atau pengikat pengotor seperti yang ditunjukkan pada reaksi 2.1 (Spencer, 1985).

Setelah itu, dilakukan identifikasi fasa dari batu kapur menggunakan mesin XRD *PAN analytical*. Pengujian dilakukan dengan posisi 2θ dari 10° sampai 90° dan menggunakan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar $1,54056 \text{ \AA}$. Batu kapur yang digunakan berupa dolomit yang berasal dari Gresik. Batu kapur telah diayak dengan ayakan 50 mesh atau $300 \mu\text{m}$. Hasil pengujian XRD dari batu kapur dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hasil Pengujian XRD Batu Kapur



Pengujian XRD dari batu kapur menghasilkan *peak* senyawa yang ditunjukkan pada gambar 4.2 diatas. Hasil pengujian XRD dianalisa dengan menggunakan *PDF-2 Release 2011*. Dari *peak* tersebut dapat diketahui fasa-fasa yang terdapat pada batu kapur. Semakin tinggi *peak* yang terbentuk menandakan semakin banyaknya juga fasa yang terdapat pada batu kapur tersebut, maka dari analisa *peak* didapatkan fasa dominan pada batu kapur adalah *Calcium Magnesium Carbonate* ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

4.2 Karakterisasi *Direct Reduced Iron* Hasil Reduksi Pasir Besi

4.2.1 Kadar Fe yang Terbentuk pada *Direct Reduced Iron* Hasil Reduksi Briket Pasir Besi

Kandungan unsur Fe dari *direct reduced iron* hasil reduksi briket pasir besi dapat diketahui dengan menggunakan pengujian EDX. Pengujian EDX dilakukan dengan alat SEM PANalytical milik Departemen Teknik Material ITS. Hasil pengujian EDX dari *direct reduced iron* bisa dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian EDX *Direct Reduction Iron*

Parameter	Fe	Si	Mg	Ca	Ti	Al
%Wt	75,722	3,11	4,24	1,06	2,295	1,21

Berdasarkan Tabel 4.4 kandungan Fe total dari *direct reduced iron* hasil reduksi briket pasir besi adalah 75,722%. Hal ini meningkat sebesar 17,792 % dari kandungan Fe total pasir besi. Kenaikan kandungan Fe total menandakan bahwa telah terjadi proses reduksi briket pasir besi yang mengandung fasa besi oksida. Tereduksinya fasa besi oksida yang terdapat pada briket pasir besi dikarenakan fasa besi oksida bereaksi dengan gas CO yang berasal dari batubara dan batu kapur sesuai dengan persamaan 2.9, persamaan 2.10 dan persamaan 2.11.

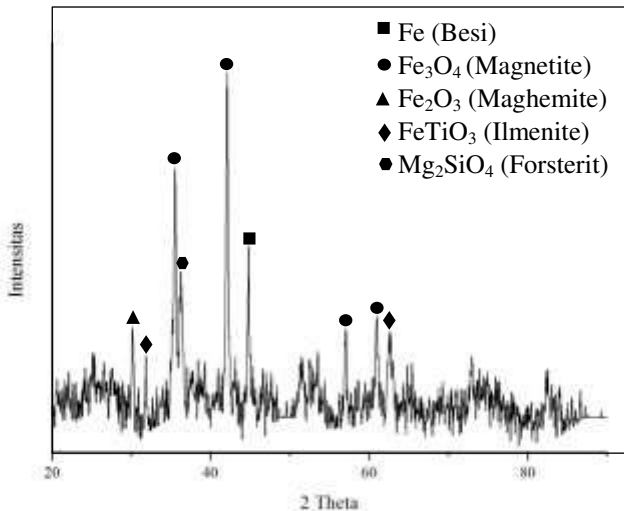


Sesuai dengan persamaan ini besi oksida tereduksi sesuai dengan penambahan gas CO dari batubara dan batu kapur yang merupakan agen reduktor (Arabinda dan Bidyapati, 2011)

Selain itu, masih terdapatnya kandungan unsur selain Fe seperti silikon, magnesium, kalsium dan aluminium berpotensi menghasilkan fasa slag yang lebih banyak pada permukaan partikel yang dimana fasa slag tersebut dapat menghalangi laju reduksi dan pertumbuhan fasa Fe pada briket pasir besi. Kemudian impuritas silikon dan aluminium tersebut menyebabkan rendahnya kandungan Fe yang diperoleh (Yufeng Guo, 2015). Selain itu, kandungan unsur Ti pada hasil reduksi briket pasir besi mengindikasikan masih adanya fasa besi oksida titan yang terbentuk pada temperatur 1100-1350⁰C, sehingga mengurangi kandungan Fe dari hasil reduksi briket pasir besi (Liu., dkk, 2016).

4.2.2 Indetifikasi Fasa dari *Direct Reduced Iron* Hasil Reduksi Pasir Besi

Indetifikasi fasa dari *direct reduced iron* hasil reduksi pasir besi dilakukan menggunakan alat uji XRD *PAN Analytical* milik Departemen Teknik Material, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Sudut difraksi yang dipakai adalah pada posisi 2 θ 10 – 90° dan menggunakan panjang gelombang CuK α sebesar 1.54056 Å. Selanjutnya grafik difraksi hasil uji XRD dianalisa menggunakan JCPDF *card PDF-2 Release 2011*. Hasil pengujian XRD *direct reduced iron* dari hasil reduksi pasir besi dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hasil Pengujian XRD *Direct Reduced Iron*

Dari hasil pengujian XRD yang ditunjukkan oleh gambar 4.3 dapat diketahui fasa dominan yang terdapat pada *direct reduced iron* hasil reduksi pasir besi berupa besi (Fe) dengan puncak 2θ 44,8270, magnetit (Fe₃O₄) dengan puncak 2θ 35,5122, 43,1060, 57,0851 dan 62,5952, maghemit (Fe₂O₃) dengan puncak 2θ 30,1810, ilmenit (FeTiO₃) dengan puncak 2θ 31,8666, 63,4721, serta forsterit (Mg₂SiO₄) dengan puncak 2θ 36,2542.

Berdasarkan gambar 4.3 dari hasil pengujian XRD memiliki puncak tertinggi dengan fasa Fe, hal tersebut menunjukkan bahwa proses reduksi briket pasir besi telah berlangsung. Sesuai dengan pengujian derajat metalisasi yang merupakan prosentase dari kandungan Fe metalik yang terbentuk dari Fe total yang ada pada briket pasir besi hasil reduksi. Didapatkan derajat metalisasi dari *direct reduced iron* sebesar 66,52%. Tetapi dari hasil pengujian derajat metalisasi yang



didapatkan, maka proses reduksi briket pasir besi yang terjadi belum maksimal, dikarenakan terdapatnya fasa besi oksida seperti magnetite (Fe_3O_4), maghemit (Fe_2O_3) dan ilmenite (FeTiO_3) yang terindikasi dari hasil pengujian tersebut.

Terbentuknya fasa magnetite (Fe_3O_4), dan maghemit (Fe_2O_3) dari *direct reduced iron* hasil reduksi pasir besi terjadi karena proses pendinginan yang berjalan lambat (Biswas, 1982). Adanya fasa magnetite (Fe_3O_4) dan maghemit (Fe_2O_3) menandakan bahwa masih adanya fasa besi oksida dari pasir besi yang belum tereduksi, hal ini mengindikasikan proses difusi gas reduktor (CO) ke dalam briket pasir besi belum maksimal (McKewan, 1958).

Selain itu, terbentuknya fasa FeTiO_3 pada proses reduksi briket pasir besi disebabkan laju reduksi besi oksida dari senyawa ilmenit memang sedikit lebih rendah jika dibandingkan dengan oksida besi natural (Merk dan Pickles, 1988). Serta ilmenit merupakan senyawa kristalin yang stabil pada temperatur likuidus ($1100\text{--}1350^\circ\text{C}$) sehingga pada temperatur tersebut senyawa ilmenit kerap kali terbentuk (Yiran Liu, dkk, 2016). Sedangkan berdasarkan penelitian Hai-Peng Gou tahun 2016 fasa ilmenite dapat tereduksi dengan menggunakan reaksi karbotermik pada temperatur diatas 1500°C . Reaksi karbotermik yang terjadi ditunjukkan pada persamaan reaksi (2.12). (Hai-Peng Gou, 2016).

Selain itu, terdapatnya fasa forsterit (Mg_2SiO_4) yang merupakan fasa pengotor yang terdapat pada *direct reduced iron* hasil reduksi briket pasir besi. Fasa Mg_2SiO_4 dapat terbentuk dari reaksi antara MgO dan SiO_2 pada temperatur $1100\text{--}1400^\circ\text{C}$. (Brindley dan Hayami, 2006)



4.3 Pengaruh Arus *Electric Arc Furnace* terhadap Kandungan Fe Total pada *Pig Iron*

Pada proses peleburan sampel *direct reduced iron* hasil reduksi briket pasir besi menggunakan *electric arc furnace* dengan variasi sesuai dengan Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Penggunaan Arus dalam Penelitian

No.	Arus (A)	Waktu (menit)	Tegangan (Volt)
1.	140	6	16,2
2.	160	6	16,2
3.	180	6	16,2
4.	200	6	16,2

Sampel hasil peleburan *direct reduced iron* dengan menggunakan setiap variasi arus kemudian diuji dengan alat EDX untuk mengetahui unsur dan presentase unsur yang terkandung dalam *pig iron* yang diperoleh dari proses peleburan *direct reduced iron*. Pengujian EDX dilakukan dengan alat SEM *Panalytical* milik Departemen Teknik Material ITS. Data hasil uji EDX *pig iron* hasil peleburan *direct reduced iron* terdapat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Komposisi Unsur pada *Pig Iron* Hasil Peleburan

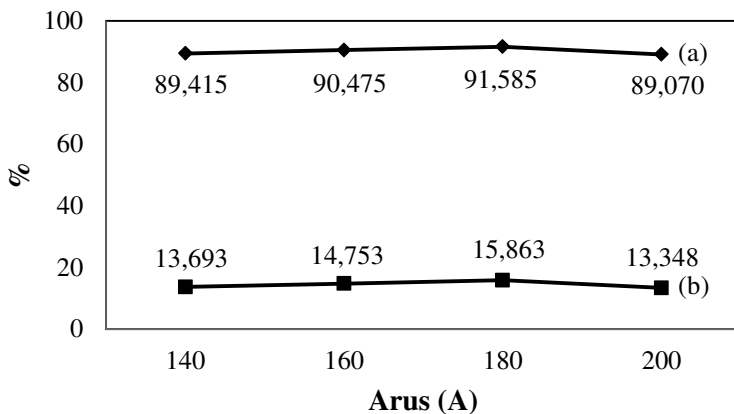
Unsur (%wt)	Variasi Arus (A)			
	140	160	180	200
Fe	89,415	90,475	91,585	89,070
Ti	7,280	6,975	6,095	7,787
Si	0,660	0,510	0,795	0,575

Berdasarkan data yang didapatkan pada Tabel 4.6, dapat diketahui bahwa telah terjadi peningkatan kandungan Fe total anantara *direct reduced iron* yaitu sebesar 75,722% dan *pig iron*



sesuai dengan perbedaan penggunaan arus dalam proses peleburan *direct reduced iron* dengan menggunakan *electric arc furnace*. Kandungan Fe total *pig iron* yang tertinggi sebesar 91,585% dengan menggunakan arus peleburan *direct reduced iron* 180 A. Sedangkan pada penggunaan arus 140 A kandungan Fe total yang terdapat pada *pig iron* sebesar 89,4155, dengan menggunakan arus 160 A didapatkan kandungan Fe total *pig iron* sebesar 90,475% dan dengan menggunakan arus 200 A didapatkan kandungan Fe total *pig iron* sebesar 89,070%.

Dari data Tabel 4.6 hasil perbandingan kandungan Fe total dan kenaikan kandungan Fe total dari *direct reduced iron* terhadap *pig iron* dapat di plot pada grafik pengaruh variabel arus terhadap kandungan Fe total dalam *pig iron* dan kenaikan kandungan Fe total, adapun grafik kandungan Fe total dalam *pig iron* dengan kenaikan kandungan Fe total *pig iron* terhadap *direct reduced iron* dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Pengaruh Arus terhadap (a) Kandungan Fe Total pada *Pig Iron* dan (b) Kenaikan Kandungan Fe Total



Berdasarkan Gambar 4.4 menunjukkan kandungan Fe Total Dari Gambar 4.4 dapat diketahui bahwa proses peleburan *direct reduced iron* telah terjadi dengan baik. Hal ini dibuktikan dengan kenaikan kandungan Fe total. Kenaikan ini dikarenakan tereduksinya fasa besi oksida pada *direct reduced iron* seperti magnetite (Fe_3O_4), hematite (Fe_2O_3) dan ilmenite (FeTiO_3). Fasa Fe dapat memisahkan dari beberapa fasa besi oksida ketika dipanaskan diatas temperatur leleh unsur besi yaitu 1535°C . Kenaikan kandungan Fe total juga dipengaruhi adanya reduktor batubara yang ditambahkan saat peleburan dengan *electric arc furnace*. Penambahan batubara sebagai penghasil gas CO untuk proses reduksi besi oksida yang masih terdapat pada *direct reduced iron*. Berdasarkan persamaan Boudouard (2.9), (2.10) dan (2.11). Selain itu, penambahan fluks SiO_2 untuk mengikat unsur pengotor yang terdapat pada *direct reduced iron*.

Pada saat proses peleburan *direct reduced iron*, proses terjadi diatas temperatur titik leleh yang akan menghasilkan *pig iron* dimana sebagian besar unsur pengotor memisahkan dari unsur besi ketika berada dalam fase cair dan selanjutnya akan mengambang di atasnya ketika membeku. Saat temperatur pemanasan yang sangat tinggi, reduksi dan pemisahan beberapa unsur pengotor menghasilkan kandungan unsur silikon dalam kadar kurang dari 1% tergantung pada komposisi bahan dan kondisi proses (Yildirim, 2017). Menurut Anameric tahun 2014 *pig iron* yang baik mengandung kandungan Fe total antara 90 – 95,5%. Dalam penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa masih terdapat kandungan Fe total yang dibawah 90%.

Pada penggunaan arus sebesar 140 A dalam proses peleburan *direct reduced iron* didapatkan kandungan Fe total *pig iron* sebesar 89,415%. Kandungan Fe total yang dihasilkan cenderung rendah jika dibandingkan dengan pernyataan Anameric tahun 2014, kandungan Fe total *pig iron* minimal 90%. Jika dilihat dari hasil pengujian EDX pada Tabel 4.5 masih



terdapatnya unsur pengotor seperti Ti dan Si yang menyebabkan kandungan Fe total *pig iron* masih rendah. Hal ini dipengaruhi oleh penggunaan arus yang rendah mengakibatkan temperatur *slag* menurun dan *slag* sulit untuk dikeluarkan. Sehingga kandungan Fe total yang dihasilkan lebih rendah (Adil Jamali, 2005).

Pig iron hasil peleburan *direct reduced iron* dengan arus 160 A menghasilkan kandungan Fe total sebesar 90,475%. Kandungan Fe total yang dihasilkan lebih tinggi, serta kandungan unsur pengotor seperti Ti dan Si yang lebih rendah dibandingkan dengan kandungan Fe total dan kandungan unsur pengotor pada peleburan *direct reduction iron* dengan arus 140 A. Hal ini mengindikasikan penggunaan arus yang semakin tinggi mengakibatkan temperatur *slag* meningkat dengan kenaikan arus pada proses peleburan *direct reduced iron*. Sehingga kandungan Fe total yang dihasilkan meningkat (Adil Jamali, 2005).

Pada peleburan *direct reduced iron* menggunakan arus 180 A menghasilkan kandungan Fe total yang paling tinggi sebesar 91,585%. Sedangkan unsur pengotor seperti Ti dan Si memiliki kandungan yang cukup rendah. Sehingga kandungan Fe totalnya meningkat. Menurut perhitungan neraca panas, arus yang paling optimal yang dibutuhkan untuk melebur *direct reduced iron* adalah 180 A. sehingga dengan arus tersebut akan menghasilkan energi yang cukup untuk menghasilkan reaksi reduksi pada besi oksida menjadi besi. Sedangkan penggunaan arus 200 A dalam peleburan *direct reduced iron* menghasilkan kandungan Fe total yang paling rendah sebesar 89,07% dan kandungan unsur pengotor meningkat. Energi yang berlebih pada proses peleburan DRI akan menyebabkan reaksi berlangsung terlalu tinggi dan akan berakibat pada turunnya kandungan besi total dalam *pig iron*. (Yousef, 2010). Arus 200 A menyebabkan kelebihan energi peleburan jika ditinjau dari perhitungan neraca panas. Kandungan



Fe total yang dihasilkan juga lebih rendah dibandingkan dengan penggunaan arus 180 A. Dimana semakin tinggi energi berlebih dari *electric arc furnace* akan menyebabkan kandungan Fe total juga semakin rendah. Berdasarkan Yu Jen Liu dkk tahun 2010, penggunaan arus pada *electric arc furnace* dengan waktu tertentu memiliki titik optimum dalam proses peleburan yang menghasilkan temperatur yang maksimal. Efek temperatur peleburan pada kandungan besi total akan semakin meningkat berbanding lurus dengan peningkatan temperatur peleburan dari 1500 sampai 1575°C (Yuan, 2017). Saat arus yang menghasilkan temperatur sudah berada pada kondisi maksimal. Diatas temperatur tersebut akan mengalami pengurangan kandungan Fe total (Yan-chun Li, 2017).

Jika kandungan Fe total dari *pig iron* hasil peleburan *direct reduced iron* dibandingkan dengan peningkatan kandungan Fe total *pig iron* terhadap kandungan Fe total *direct reduced iron* yang memiliki kandungan Fe sebesar 75,722%, maka akan mengalami peningkatan sesuai dengan penggunaan arus pada proses peleburan *direct reduced iron*. Peningkatan kandungan Fe total sebanding lurus dengan kandungan Fe total yang terdapat pada *pig iron*.

Pada Gambar 4.4 menunjukkan kenaikan kandungan Fe total tertinggi sebesar 15,863% diperoleh dengan menggunakan arus sebesar 180 A pada proses peleburan *direct reduced iron*. Sedangkan kenaikan kandungan Fe total terendah sebesar 13,348% yang diperoleh saat menggunakan arus sebesar 200 A pada proses peleburan *direct reduced iron*. Serta dengan menggunakan arus 140 A mengalami kenaikan kandungan Fe total sebesar 13,693% dan menggunakan arus 160 A mengalami kenaikan kandungan Fe total sebesar 14,753%.

Berdasarkan Joseph E. Goodwill dkk tahun 1987 arus yang digunakan dalam proses peleburan menggunakan *electric arc*



furnace memiliki titik optimum dalam proses peleburan. Jika arus yang digunakan untuk melebur melebihi daya yang dibutuhkan untuk melebur, maka produk yang dihasilkan akan mengalami penurunan kadar (Yousef A. Mobarok, 2005).

Maka dari itu dapat disimpulkan bahwa penggunaan arus dalam proses peleburan *direct reduced iron* memiliki besaran yang optimum. Pada penelitian ini penggunaan arus yang optimum pada 180 A menghasilkan kandungan Fe total yang paling optimal sebesar 91,585% dengan kenaikan kandungan Fe total sebesar 15,863%. Sedangkan penggunaan arus 200 A menghasilkan kandungan Fe total yang paling rendah sebesar 89,07% dengan kenaikan kandungan Fe total sebesar 13,348%.

4.4 Pengaruh Arus *Electric Arc Furnace* terhadap *Recovery Fe* pada *Pig Iron*

Proses peleburan *direct reduced iron* dilakukan untuk meningkatkan kandungan Fe dari *pig iron* serta memisahkan Fe dengan unsur atau senyawa pengotor yang tidak diinginkan. Suatu proses dikatakan optimal jika proses tersebut mendapatkan perolehan *recovery* logam dengan persentase tinggi, persentase perolehan ini dihitung dari massa unsur hasil proses dibanding dengan massa unsur awal proses yang sesuai dengan persamaan (3.7).

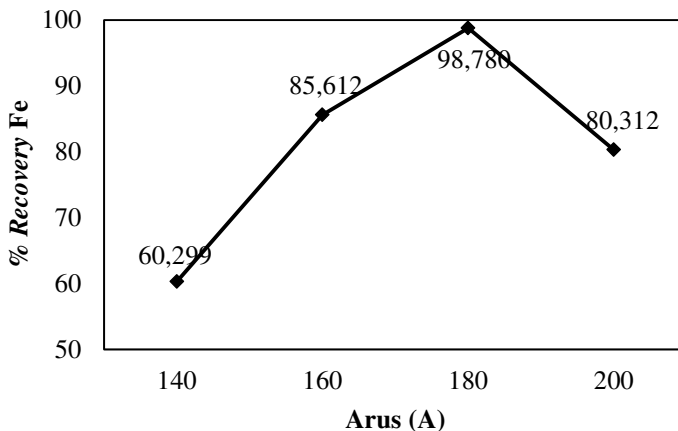
Untuk mengetahui perolehan *recovery* Fe dilakukan dengan membandingkan massa Fe hasil peleburan dengan massa Fe awal. Perhitungan massa Fe hasil peleburan dilakukan dengan mengalikan kadar Fe dengan total massa perolehan Fe hasil peleburan. Sedangkan perhitungan massa Fe awal dilakukan dengan mengalikan kadar Fe dengan massa awal *direct reduced iron*. Perhitungan massa Fe awal dan hasil peleburan ditampilkan pada Tabel 4.7.



Tabel 4.7 Perhitungan Massa dan *Recovery* Fe pada *Pig Iron*

Arus (A)	Massa awal (gr)	Kadar Fe awal (%wt)	Massa akhir (gr)	Kadar Fe akhir (%wt)	<i>Recovery</i> Fe (%)
140	40	75,722	20,426	89,415	60,299
160	40	75,722	28,660	90,475	85,612
180	40	75,722	32,668	91,585	98,780
200	40	75,722	27,310	89,070	80,312

Berdasarkan hasil perhitungan *recovery* Fe pada Tabel 4.7, dapat di plot pada grafik pengaruh variasi arus terhadap *recovery* Fe dalam *pig iron*, adapun grafik *recovery* Fe hasil peleburan *direct reduced iron* dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Pengaruh Arus terhadap *Recovery* Fe pada *Pig Iron*

Dari Gambar 4.5 dapat diketahui bahwa telah terjadi proses reduksi pada semua briket *direct reduced iron* ketika melakukan peleburan menggunakan *electric arc furnace* untuk menghasilkan *pig iron*. Dalam percobaan peleburan *direct reduced iron*, dilakukan pemisahan dari besi dengan pengotornya yang dapat



terjadi ketika proses berjalan didalam *crucible* pada temperatur tinggi sehingga dapat mempengaruhi hasil *recovery* Fe yang dihasilkan (Hui Guo, 2017).

Berdasarkan Gambar 4.6 didapatkan grafik *recovery* Fe *pig iron* hasil peleburan *direct reduced iron*. Terlihat bahwa *recovery* naik dari arus 140 A sampai 180 A. Pada penggunaan arus 140 A dalam proses peleburan *direct reduced iron* menghasilkan *recovery* Fe sebesar 60,299%. Saat penggunaan arus ditingkatkan menjadi 160 A menghasilkan *recovery* Fe sebesar 85,612%. Kemudian penggunaan arus 180 A menghasilkan *recovery* Fe yang sangat tinggi sebesar 98,780%. Kenaikkan *recovery* Fe dipengaruhi oleh proses reduksi besi oksida yang terdapat pada *direct reduced iron*, besi yang dihasilkan dalam proses peleburan memerlukan suplai gas CO yang cukup untuk proses reduksi (Li Yan Chun, 2017). Selain itu, berdasarkan perhitungan neraca panas penggunaan arus 140 A dan 160 A belum mencapai titik keseimbangan untuk proses reduksi besi oksida mmenjadi besi sehingga menghasilkan *recovery* Fe yang belum maksimal. Saat penggunaan arus 200 A berdasarkan perhitungan neraca panas energi yang dihasilkan telah cukup untuk melebur *direct reduced iron*, sehingga menghasilkan *pig iron* dengan *recovery* Fe yang maksimal.

Tetapi saat arus ditingkatkan dari 180 A menjadi 200 A dapat dilihat bahwa *recovery* Fe menurun. *Recovery* Fe pada arus 200 A sebesar 80,312% hal ini disebabkan oleh besarnya arus yang melebihi titik optimum dari neraca panas untuk melebur *direct reduction iron*. Pada arus 200 A *recovery* Fe menurun. Berdasarkan Yu Jen Liu dkk tahun 2010, penggunaan arus pada *electric arc furnace* dengan waktu tertentu memiliki titik optimum dalam proses peleburan yang menghasilkan energi yang maksimal. Efek temperatur peleburan pada kandungan besi total akan semakin meningkat berbanding lurus dengan peningkatan temperatur peleburan dari 1500 sampai 1575°C (Yuan, 2017). Jika arus yang digunakan untuk melebur melebihi daya yang

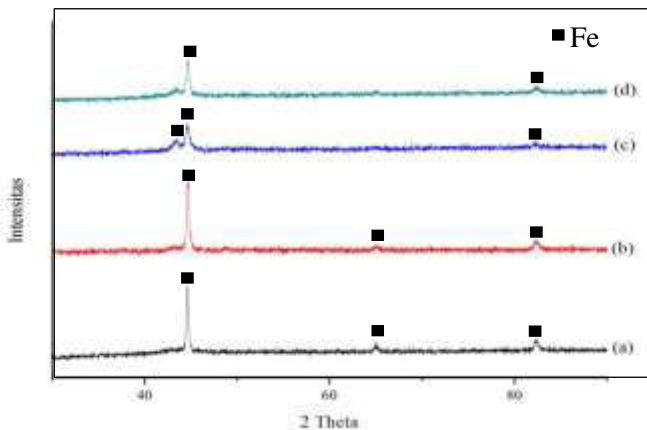


dibutuhkan untuk melebur, maka produk yang dihasilkan akan mengalami menurunkan *recovery* Fe yang dihasilkan (Yousef A. Mobarok, 2005).

Maka dari itu, berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan *recovery* Fe terbesar yaitu dengan menggunakan arus 180 A. Hal ini sebanding dengan peningkatan kandungan Fe total yang dihasilkan pada proses peleburan *direct reduced iron*.

4.5 Identifikasi Fasa dari *Pig Iron*

Identifikasi fasa dari *pig iron* hasil peleburan *direct reduced iron* dilakukan menggunakan alat uji XRD *PAN Analytical* milik Departemen Teknik Material, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Sudut difraksi yang dipakai adalah pada posisi 2θ $10 - 90^\circ$ dan menggunakan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar 1.54056 \AA . Selanjutnya grafik difraksi hasil uji XRD dianalisa menggunakan *JCPDF card PDF-2 Release 2011*. Hasil pengujian XRD pada pengaruh arus terhadap fasa yang terbentuk dalam *pig iron* hasil peleburan *direct reduced iron* dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Hasil Pengujian XRD *Pig Iron* dengan Arus sebesar (a) 140 A (b) 160 A (c) 180 A (d) 200 A



Berdasarkan hasil XRD pada Gambar 4.6 *pig iron* hasil peleburan *direct reduction iron* untuk seluruh variasi arus hampir memiliki puncak yang sama. Pada peleburan *direct reduced iron* dengan arus sebesar 140 A diketahui fasa yang terbentuk merupakan fasa besi (Fe) dengan puncak 2θ 44,6319, 64,9703 dan 82,3313. Saat peleburan *direct reduced iron* dengan arus sebesar 160 A diketahui fasa yang terbentuk merupakan fasa besi (Fe) dengan puncak 2θ 44,6456, 65,0153 dan 82,2490 serta memiliki puncak dengan intensitas yang hampir sama dengan arus 140 A.

Sedangkan pada peleburan *direct reduced iron* dengan arus sebesar 180 A diketahui fasa yang terbentuk merupakan fasa besi (Fe) dengan puncak 2θ 44,5841 dan 82,2141, selain itu muncul puncak dari fasa besi (Fe) yang baru pada 2θ 43,4941. Kemudian pada peleburan *direct reduced iron* dengan arus sebesar 200 A diketahui fasa yang terbentuk merupakan fasa besi (Fe) dengan puncak 2θ 44,7017 dan 82,3867.

4.5.1 Analisa Hasil XRD *Pig Iron* dengan Arus Peleburan *Direct Reduction Iron* sebesar 140 A

Dari hasil pengujian XRD *pig iron* dengan arus peleburan *direct reduced iron* sebesar 140 A pada Gambar 4.6 menunjukkan puncak tertinggi merupakan fasa besi (Fe). Hasil ini mengindikasikan bahwa fasa besi oksida pada *direct reduced iron* seluruhnya telah tereduksi. Proses reduksi fasa besi oksida terjadi dari penambahan reduktor batubara sehingga menghasilkan gas CO sebagai pereduksi besi oksida sesuai dengan persamaan Boudouard (Arabinda dan Bidyapati, 2011).

Selain itu sudah tidak terdapatnya fasa besi oksida titan pada hasil peleburan *direct reduced iron* juga dipengaruhi oleh reaksi yang mereduksi fasa tersebut dengan melepaskan ikatannya. Reaksi reduksi ini juga dibantu dengan penambahan reduktor gas CO yang dapat bereaksi pada temperatur diatas 1500°C (Hai-Peng Gou, 2016).



4.5.2 Analisa Hasil XRD *Pig Iron* dengan Arus Peleburan *Direct Reduction Iron* sebesar 160 A

Dari hasil pengujian XRD *pig iron* dengan arus peleburan *direct reduced iron* sebesar 160 A pada Gambar 4.6 menunjukkan puncak tertinggi merupakan fasa besi (Fe). Sudah tidak terdapatnya fasa besi oksida pada *pig iron* menandakan proses reduksi fasa besi oksida telah berjalan dengan optimal. Penambahan batubara sebagai reduktor menghasilkan gas CO membuat besi oksida tereduksi sesuai dengan persamaan Boudouard (Arabinda dan Bidyapati, 2011).

4.5.3 Analisa Hasil XRD *Pig Iron* dengan Arus Peleburan *Direct Reduction Iron* sebesar 180 A

Dari hasil pengujian XRD *pig iron* dengan arus peleburan *direct reduced iron* sebesar 180 A pada Gambar 4.6 menunjukkan puncak tertinggi merupakan fasa besi (Fe) serta terdapatnya puncak baru yang menunjukkan bahwa puncak tersebut adalah fasa besi (Fe). Sudah tidak terdapatnya fasa besi oksida pada *pig iron* menandakan proses reduksi fasa besi oksida telah berjalan dengan optimal. Penambahan batubara sebagai reduktor menghasilkan gas CO membuat besi oksida tereduksi sesuai dengan persamaan Boudouard (Arabinda dan Bidyapati, 2011).

4.5.4 Analisa Hasil XRD *Pig Iron* dengan Arus Peleburan *Direct Reduction Iron* sebesar 200 A

Berdasarkan Gambar 4.6 pengujian XRD pada *pig iron* hasil peleburan *direct reduced iron* dengan arus 200 A mengindikasikan puncak tertinggi merupakan fasa besi (Fe).

Sudah tidak terdapat lagi fasa besi oksida dan besi oksida titan menandakan bahwa proses reduksi berjalan dengan optimal. Penambahan batubara sebagai reduktor yang menghasilkan gas CO sebagai gas reduktor untuk mereduksi besi oksida berdasarkan persamaan Boudouard (Arabinda dan Bidyapati, 2011). Serta mereduksi besi oksida titan sesuai persamaan reaksi (2.12) (Haoyan Dkk, 2016).



Fasa titan yang terbentuk dari proses reduksi besi oksida titan akan berikatan dengan fluks SiO_2 menjadi *slag* pada temperatur diatas 1400°C sehingga meningkatkan kandungan Fe pada *pig iron* (Muan dan Osbara, 1965).

4.6 Karakterisasi dari *Slag* Hasil Peleburan *Direct Reduction Iron*

Untuk mengetahui karakterisasi dari *slag* yang terdapat dari proses peleburan *direct reduced iron* maka dilakukan pengujian EDX dan XRD. Identifikasi dari *slag* hasil peleburan dimulai dengan identifikasi unsur dengan pengujian EDX. Pengujian EDX dilakukan dengan alat SEM Panalytical milik Departemen Teknik Material ITS. Hasil pengujian EDX dari *slag pig iron* bisa dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil Pengujian EDX *Slag* Hasil Peleburan *Direct Reduction Iron*

Unsur	Kandungan (%wt)			
	140 A	160 A	180 A	200 A
Fe	2,835	2,41	4,305	3,63
Ti	6,005	4,35	4,97	5,11
Al	10,73	11,28	11,255	11,14
Si	19,075	19,905	19,36	20,855
Ca	17,29	17,98	11,855	16,16
Mg	8,51	9,055	9,355	8,62

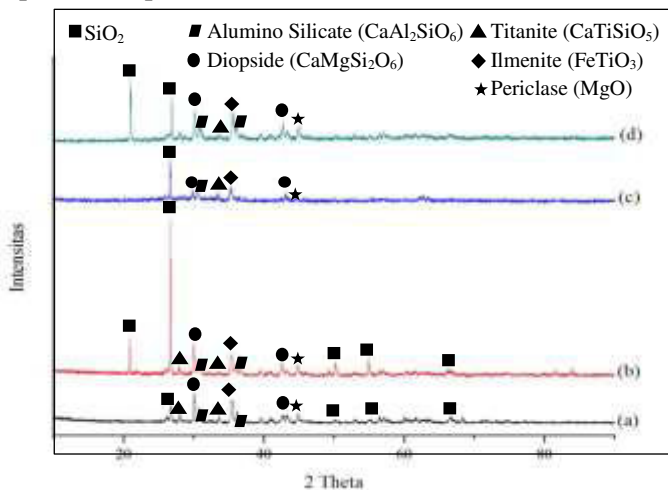
Berdasarkan Tabel 4.8 *slag* hasil peleburan *direct reduced iron* masih terdapat kandungan Fe untuk masing-masing variasi arus yang digunakan. Masih terdapatnya kandungan Fe pada *slag* dikarenakan proses pembuatan *pig iron* yang terjadi diatas temperatur lebur biasanya mengandung sedikit kandungan Fe (Urvashi dkk, 2013). Tingginya kandungan Si yang terdapat pada *slag* berasal dari *direct reduced iron* dan penggunaan fluks SiO_2 yang digunakan dalam proses peleburan *direct reduced iron*



untuk mengikat unsur pengotor dari *pig iron*. Serta terdapatnya unsur-unsur pengotor seperti Ti, Al, Ca dan Mg.

Berdasarkan penelitian dari Adil Jamali tahun 2005 penambahan fluks SiO_2 pada proses peleburan *direct reduced iron* menghasilkan *slag* dengan komposisi Si, Ca, Ti, Fe, Mg dan Al. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan fluks SiO_2 dalam proses peleburan *direct reduced iron* sudah tepat untuk mengikat unsur pengotor yang terdapat pada proses peleburan *direct reduced iron*.

Selanjutnya untuk mengidentifikasi fasa dari *slag* hasil peleburan *direct reduced iron* dilakukan menggunakan alat uji XRD PAN Analytical milik Departemen Teknik Material, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Sudut difraksi yang dipakai adalah pada posisi 2θ 10 – 90° dan menggunakan panjang gelombang $\text{CuK}\alpha$ sebesar 1.54056 Å. Selanjutnya grafik difraksi hasil uji XRD dianalisa menggunakan JCPDF card PDF-2 Release 2011. Hasil pengujian XRD *slag* dari hasil peleburan *direct reduction iron* dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Hasil Pengujian XRD *Slag* dengan Arus sebesar (a) 140 A (b) 160 A (c) 180 A (d) 200 A



Berdasarkan hasil XRD pada Gambar 4.7 *slag* hasil peleburan *direct reduced iron* dengan menggunakan arus sebesar 140 A fasa yang terbentuk adalah SiO_2 dengan puncak 2θ 26,7173, 50,2893, 57,0801 dan 68,2805, Diopside pada puncak 2θ 30,0736 dan 42,7468, Titanite dengan puncak 2θ 28,0086 dan 33,6081, Alumino Silicate dengan puncak 2θ 31,0333 dan 36,0884, Ilmenite dengan puncak 2θ 35,5151 serta Periclase pada puncak 2θ 43,2105.

Pada arus 160 A, fasa yang terbentuk pada *slag* hasil peleburan *direct reduced iron* adalah SiO_2 dengan puncak 2θ 21,0078, 26,6694, 50,1655, 57,9701 dan 68,4679, Diopside pada puncak 2θ 30,0117 dan 42,5284, Titanite dengan puncak 2θ 27,9076 dan 33,4881, Alumino Silicate dengan puncak 2θ 30,8372 dan 36,1786, Ilmenite dengan puncak 2θ 35,4261 serta Periclase pada puncak 2θ 43,0786.

Pada arus 180 A, fasa yang terbentuk pada *slag* hasil peleburan *direct reduced iron* adalah SiO_2 dengan puncak 2θ 26,6324, Diopside pada puncak 2θ 29,8705 dan 43,0898, Titanite dengan puncak 2θ 33,4429, Alumino Silicate dengan puncak 2θ 30,5297, Ilmenite dengan puncak 2θ 35,3120 serta Periclase pada puncak 2θ 43,0898.

Sedangkan dengan arus 200 A, fasa yang terbentuk pada *slag* hasil peleburan *direct reduced iron* adalah SiO_2 dengan puncak 2θ 20,9760 dan 26,8833, Diopside pada puncak 2θ 30,1541 dan 42,6271, Titanite dengan puncak 2θ 33,6808, Alumino Silicate dengan puncak 2θ 30,7374 dan 36,0872, Ilmenite dengan puncak 2θ 35,7672 serta Periclase pada puncak 2θ 43,3151.

Terdapatnya fasa SiO_2 dari hasil XRD *slag* merupakan penggunaan fluks yang ditambahkan untuk mengikat pengotor pada proses peleburan *direct reduced iron*. Kemudian terdapatnya fasa diopside yang muncul pada *slag* di setiap variasi arus pada proses peleburan *direct reduced iron* menunjukkan bahwa terjadi ikatan senyawa antara CaO , MgO dan SiO_2 dengan adanya gas



CO. Berdasarkan Luttge dan Metz tahun 1991 diopside dapat terbentuk dari reaksi antara CaO , MgO dan SiO_2 .

Terdapatnya fasa titanite pada *slag* hasil peleburan *direct reduced iron* menunjukkan bahwa penggunaan fluks SiO_2 telah dapat mengikat pengotor Ti, berdasarkan Muan dan Osborn tahun 1965 fasa titanite dapat terbentuk pada temperatur diatas 1400°C . Selain itu terdapatnya fasa alumino silicate pada *slag* di setiap variasi arus peleburan menunjukkan terjadi ikatan antara fluks SiO_2 dengan unsur Al dan Ca. Berdasarkan Lemanski dkk tahun 2016, $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$ dapat terbentuk pada temperatur diatas 1000°C . Adanya fasa ilmenite pada *slag* hasil peleburan *direct reduced iron* mengindikasikan bahwa unsur Fe yang terdapat pada *slag* masih berikatan dengan TiO_2 . Fasa ini kerap muncul pada temperatur tinggi (Liu dkk, 2016). Kemudian terdapatnya fasa periclase pada *slag* hasil peleburan *direct reduced iron* mengindikasikan bahwa ada beberapa yang belum berikatan menjadi fasa diopside. Selain itu, fasa periclase memungkinkan menghambat proses reduksi besi oksida titan sehingga terdapatnya fasa ilmenite pada *slag* (Merk dan Pickles, 1988).



(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data yang telah dilakukan maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada proses reduksi briket pasir besi, dihasilkan *direct reduced iron* dengan kandungan Fe total sebesar 75,722%.
2. Variasi besar arus yang paling optimal pada pembuatan *pig iron* sebesar 180 A dibandingkan dengan arus sebesar 140 A, 160 A dan 200 A.
3. Dalam penelitian yang dilakukan, kandungan Fe total pada *pig iron* tertinggi adalah arus 180 A, dengan kandungan Fe total sebesar 91,585%. Serta kandungan Fe total terendah sebesar 89,070% dengan arus sebesar 200 A.
4. *Recovery Fe pig iron* tertinggi pada arus 180 A sebesar 98,780% dibandingkan dengan arus 140 A sebesar 60,299%, arus 160 A sebesar 85,612% dan arus 200 A sebesar 80,312%.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya mengenai proses pembuatan *pig iron* dengan variasi yang lain, beberapa saran yang dapat diberikan antara lain:

1. Perlu dilakukan penggunaan arus dalam pembuatan *pig iron* sekitar 180 A agar mendapatkan kandungan Fe total yang lebih maksimal.
2. Melakukan penelitian mengenai pembuatan *pig iron* dengan jenis fluks yang lain, agar dapat mengikat pengotor yang masih terdapat pada *pig iron*



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Anameric, B., dan S.K. Kawatra. (2006). ***“Laboratory Study Related to the Production and Properties of Pig Iron Nuggets”***. Minerals & Metallurgical Processing; 23,1. Pp.52.
- Andrei, H., dkk. (2011). ***Power Quality and Electrical Arc Furnace***. Valahia University of Targociste. vol (5) 78-98.
- Anggraeni, N.D. 2008. ***Analisa SEM dalam pemantauan Proses Oksidasi Magnetite menjadi Hematite***. Seminar Nasional-VII Rekayasa dan Aplikasi Teknik Mesin di Industri.
- Anhar, A. B. (2015). ***“Studi pengaruh variasi Komposisi Batubara dan Batu kapur pada briket Pasir Besi Terhadap Kandungan Fe total dan Fe metalisasi”***. Tugas Akhir Teknik Material dan Metalurgi ITS, 2-30.
- Association, W.S. (2014). ***Steel Statistical Yearbook 2014***. Brussels: Worldsteel Committee on Economics Studies.
- Bhawan, P. (2010). ***Comprehensive Industry Document on Electric Arc & Induction Furnaces***. New Delhi. Central Pollution Control Board Ministry of Environment & Forests.
- Bonyton, Robert.S. (1980). ***Chemistry and technology of Lime and Limestone***. 2nd edition. John Wiley& Sons, Inc. Toronto.
- Brindley, G.W., and Hayami, R. (2006). ***Kinetics and Mechanism of Formation of Forsterite (Mg_2SiO_4) by Solid State Reaction of MgO and SiO_2*** . A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics (8) ; 505-514.
- Carvalho, Anthony de, dkk. (2015). ***CAPACITY DEVELOPMENTS IN THE WORLD STEEL INDUSTRY***. Paris: OECD Steel Committee.

- Chatterjee, Amit. (1988). *Proceedings of XV Symposium of SIDOR*. Puerto Ordaz, Venezuela.
- Chatterjee, Amit. (2010). *Sponge iron production by direct reduction of iron oxide*. New Delhi: PHI Learning Private Ltd.
- Ektrop, S. (1945). *Hoganas Sponge Iron Process*. Jernkontorets Annaler, BSITS translation 275, Vol. 22, 705-721.
- El-Geassy, A. H. A., Nasr, M. I., Omar, A. A., & Mousa, E. S. A. (2007). *Reduction kinetics and catastrophic swelling of MnO₂-doped Fe₂O₃ compacts with CO at 1073-1373 K*. ISIJ international, 47(3), 377-385.
- Goodwill, Joseph E. (1987). *Understanding Electric Arc Furnace Operations For Steel Production*. Center for Metals Production Vol. 3 (2).
- Gou, Hai-peng, dkk. 2016. *Kinetic Study on Carbothermic Reduction of Ilmenite with Active Carbon*. Beijing: Science Direct.
- Grzella, J. dkk. (2005). *Metallurgical Furnace*. Frankfurt, Federal Republic of Germany.
- Guo, H., Yin, S., Yu, Q., Yang, X., Huang, H., Yang, Y., and Gao, F. (2017). *Iron recovery and active residue production from basic oxygen furnace (BOF) slag for supplementary cementitious materials*. Resources, Conservation & Recycling 129, 209–218.
- Harald, K. And Vucinic Bojan. (2017). *INDUCTION FURNACE VERSUS ELECTRIC ARC FURNACE IN STEELMAKING PROCESS; ADVANTAGES AND DISADVANTAGES*. Italy: DCM Process Technology.
- Herianto, E. (2008). *Besi Nugget dari Pasir Besi Indonesia Sebagai Material Logam Dasar*. Pusat Penelitian Metalurgi, 1-10.
- Hernandez, A., Mayordomo, J.G., Asensi, R. & Beites, L.F. (2005). *A Method Based on Interharmonics for Flicker Propagation Applied to Arc Furnaces*. IEEE Transactions on Power Delivery: 20(3), 2005, 2334-2342

- Hidayatullah, A. B. (2016). *Studi variasi geometri briket pada Campuran Bijih Besi dan Pasir Besi terhadap Kandungan Derajat Metalisasi dan Fe Metalisasi*. Tugas Akhir Material Metalurgi ITS, 2-40.
- Isnugroho, K., And David C. Birawidha. (2016). *The Production of Pig Iron from Crushing Plant Waste using Hot Blast Cupola*. Research Unit for Mineral Technology, Indonesia Institute of Sciences, South Lampung, Lampung, Indonesia. Vol (1);1-7.
- Jones, J.A.T., B. Bowman, P.A. Lefrank,(1998). *"Electric Furnace Steelmaking", in The Making, Shaping and Treating of Steel*. R.J. Fruehan. The AISE Steel Foundation: Pittsburgh. p. 525–660.
- Jumali, Adil. (2005). *Production of Hot Metal from a Titanium-Containing Iron sand by using Induction Furnace*. Indonesia: LIPI.
- Khattoi, S. C., & Roy, G. G. (2010). *Sponge Iron Production From Ore Coal Composite Pellets in Tunnel Kiln*. Project Engineering Consultancy, 1-20.
- Khodabandeh, E. dkk. (2017). *Parametric Study of Heat Transfer in an Electric Arc Furnace and Cooling System*. Iran: Applied Thermal Engineering.
- Komarudin. (2008). *Studi Pengaruh Penambahan Batubara terhadap Intensitas Fe*. Tugas Akhir. Teknik Metalurgi dan Material FT UI, 2-40.
- Lemanski, K., Walerczyk, W., and Deren, P.J. (2016). *Luminescent properties of europium ions in $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$* . Journal of Alloys and Compounds (672) 595-599.
- Li, Yan-chun, dkk. 2017. **Iron Extraction from Lead Slag by Bath Smelting**. Changha: Science Direct.
- Li, Y., Sun Tichang, Zou Anhua, dan Xu Chengyan. (2012). *Effwct of Coal Levels during Direct Reduction Roasting of High Phosphorus Oolitiic Hematite Ore in a*

- Tunnel Kiln*. Journal of Mining Science and Technology, 323-328.
- Liu, Yi-ran, Jiang-Liang Zhang, Zheng-jian Liu, dan Xiang-dong Xing. (2016). “*Phase Transformation behavior of titanium during carbothermic reduction of titanomagnetite ironsand*”. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. Volume 23 : Page 760.
- Liu, Yu-Jen, Chang, Gary W., and Hong, Rong-Chin. (2010). *Curve-fitting-based method for modeling voltage–current characteristic of an ac electric arc furnace*. *Electric Power Systems Research* 80 ; 572–581
- Mashuri. N, Masruroh. A, Malik. E, Yahya. Triwikantoro. dan Darminto. (2007). *Transformasi fasa pada nanokomposit Fe_3O_4 - Fe_2O_3* . *Jurnal Sains Material Indonesia Edisi Khusus Desember 2009*. Vol 9. Page 135-140.
- McIntyre, C.J. dkk. (1920). *The Making, Shaping and Treating of Steel (2nd ed.)*. Pittsburgh: Carnegie Steel Co. p. 174. OCLC 2566055.
- McKewan, W.M. (1958). *Trans.*, IIM-AIME, 212, 791.
- Mobarak, Youssef A. (2005). *ARC FURNACE LOADS VOLTAGE STABILITY*. Electric Engineering Department High Institute of Energy, South Valley University Aswan, Egypt.
- Muan, A., and Osborn, E.F. (1965). *Phase Equilibria among Oxides in Steelmaking*. Addison-Wesley.
- Pintowantoro, S. (2012). *Reduksi Pasir Besi Secara Ekonomis dan Ramah Lingkungan Dengan Memanfaatkan Energi Microwave*. Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya.
- Prasetyo, Eko P. (2010). “*Struktur dan Kinerja Industri Besi dan Baja Indonesia Tidak Sekuat dan Sekokoh*

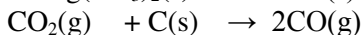
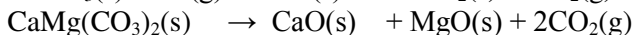
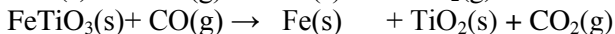
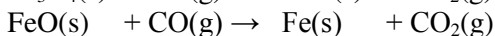
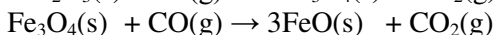
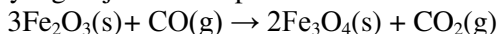
- Namanya*". Fakultas Ekonomi Universitas Negeri Semarang, 12 -27.
- Pretorius, E. And Helmut Oltmann. (1998). *EAF Fundamentals*. LWB Refractories: Process Technology Group.
- Ross HU. (1980). *Physical Chemistry: Part I Thermodynamics. Direct Reduced Iron Technology and Economics of Productions and Use*. Warrendale : The Iron and Steel Society.
- Saleh, N., and Siti Rochani. (2015). *Study on Basicity in Direct Reduced Iron Smelting*. Indonesian Mining Journal Vol. 18, No. 2:59-70.
- Sarangi, A. And Bidyapati Sarangi. (2011). *Sponge Iron Production in Rotary Kiln*. New Sholihah, L.K., 2010. *Sintesis dan Karakteristik Partikel Nano Fe_3O_4 yang berasal dari Pasir Besi dan Fe_3O_4 Bahan Komersial (Aldrich)*. Jurusan Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, SurabayaDelhi. PHI Learning Private Limited.
- Spencer, J. (1985). *Sulfidation of Half-Calcined Dolomite in Hydrogen-Sulfide/Deuterium/Water/Nitrogen*. Structur and Mechanisms, 2.
- Srivastava, U., Kawatra, S.K., and Eisel, T.C. (2013). *Production of pig iron by utilizing biomass as a reducing agent*. International Journal of Mineral Processing (119) 51–57.
- Takuda, M., H. Yoshikoshi, dan M.Ohtano. (1973). *Trans. ISIJ*, Vol.13, No. 5, September 1973, p. 350.
- Thomas. S. (2016). *"REMINISCENCES OF THE EARLY ANTHRACITE-IRON INDUSTRY". TRANSACTIONS OF THE AMERICAN INSTITUTE OF MINING ENGINEERS*. Retrieved 5 December 2016.
- Wasik, Hairul. (2016). *Studi Variasi Jenis Arang paddda Briket Pasir Besi terhadap Kandungan Fe Total dan Derajat Metalisasi pada Proses Pembuatan Sponge Iron*. Tugas Akhir Material Metalurgi ITS, 2-40.

- Wikipedi. **Batubara.** (online).
(https://id.wikipedia.org/wiki/Batu_baru, 12 November 2017).
- Wikipedi. **Batu Kapur.** (online).
(https://id.wikipedia.org/wiki/Batu_baru, 12 November 2017).
- Yulianto, S. (2007). ***Fasa Oksida Besi Untuk Sintesis Serbuk Magnet Ferit***. Jurnal Sains Materi Indonesia. Vol 8. Page 39-41.
- Zulfalina, dkk. (2004). ***Identifikasi Senyawa Mineral dan Ekstraksi Titanium Dioksida dari Pasir Mineral***. Indonesian Journal of Material Science.
- Zulfiadi, Zulhan. (2013). ***Aspek Teknologi dan Ekonomi Pembangunan Pabrik Pengolahan Bijih Besi Menjadi Produk Baja di Indonesia***. Teknik Metalurgi-Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan. ITB.

Lampiran A (Perhitungan Teoritis Berat)

Perhitungan stoikiometri perbandingan pasir besi: batubara: batu kapur

Pada setiap reaksi kimia diperlukan kesetimbangan rumus molekul untuk senyawa kimia dengan persamaan stoikiometri. Pada proses reduksi pasir besi terdapat beberapa reaksi kimia yang terlibat, seperti reduksi, dekomposisi, reaksi Boudouard. Persamaan reaksi yang terjadi dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Data yang dibutuhkan dalam perhitungan komposisi material adalah

- Pasir besi

Dari data pengujian EDX, diperoleh presentase berat elemen-elemen yang terkandung di dalam pasir besi yang diperoleh dari Sukabumi, Jawa Barat.

Hasil EDX Pasir Besi						
Parameter	Fe	Si	Mg	O	Ti	Al
%Wt	57.93	3.14	2.72	24.4	8.46	2.66

Dari data pengujian XRD, mineral – mineral yang terkandung dalam pasir besi dan persentasenya, antara lain:

- Maghemite (Fe_2O_3) = 16,33 %
- Magnetite (Fe_3O_4) = 46,065 %
- Ilmenite (FeTiO_3) = 21,273 %

Apabila diasumsikan setiap briket pasir besi terdiri dari 200 gram ore pasir besi maka :

- Magnetite (Fe_3O_4) = 92,130 gram >> $\frac{\text{Massa}}{\text{Mr Fe}_3\text{O}_4} = 0,397118017 \text{ mol}$
- Maghemite (Fe_2O_3) = 32,660 gram >> $\frac{\text{Massa}}{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3} = 0,204125 \text{ mol}$

- Ilmenite (FeTiO_3) = 42,546 gram >> $\frac{\text{Massa}}{\text{Mr FeTiO}_3} = 0,28027668 \text{ mol}$
- Batu bara
Dari data pengujian *proximate analysis (fixed carbon)* diperoleh konsentrasi 42,35 %.
- Batu Kapur
Dari data pengujian EDX, diperoleh persentase berat elemen-elemen yang terkandung di dalam batu kapur yang diperoleh dari Gresik, Jawa Timur.

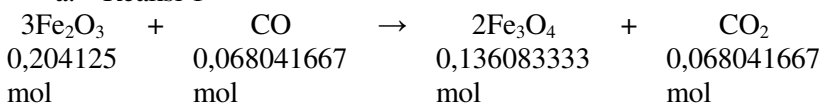
Hasil EDX Batu Kapur

No.	Elemen	Rumus Kimia	Komposisi (%)
1.	Kalsium	Ca	18.015
2.	Magnesium	Mg	14.30
3.	Karbon	C	12.6215
4.	Oksigen	O	55.0635

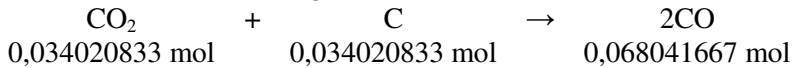
Dari data pengujian XRD, terdapat mineral – mineral lain yang terkandung dalam batu kapur adalah dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)
Dalam penelitian ini reduksi besi oksida pada pasir besi bertahap seperti berikut.

I. Reaksi Reduksi Fe_2O_3

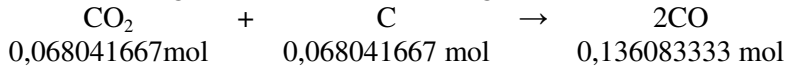
a. Reaksi 1



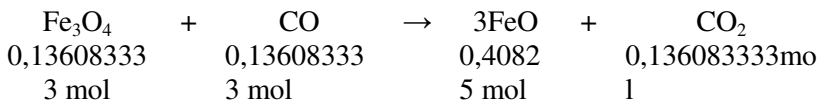
CO₂ hasil reaksi dekomposisi batu kapur yang dibutuhkan untuk bereaksi dengan C batu bara



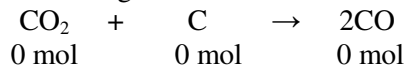
Reaksi gas CO₂ hasil reaksi 1 dengan C batubara



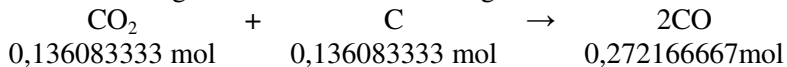
b. Reaksi 2



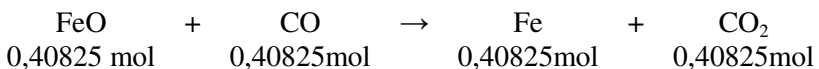
CO₂ hasil reaksi dekomposisi batu kapur yang dibutuhkan untuk bereaksi dengan C batu bara



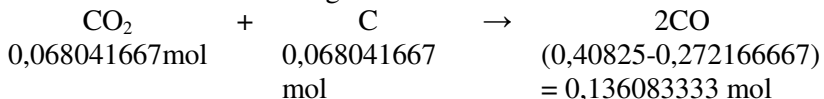
Reaksi gas CO₂ hasil reaksi 2 dengan C batubara



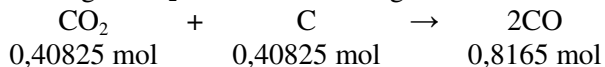
c. Reaksi 3



CO₂ hasil reaksi dekomposisi batu kapur yang dibutuhkan untuk bereaksi dengan C batu bara

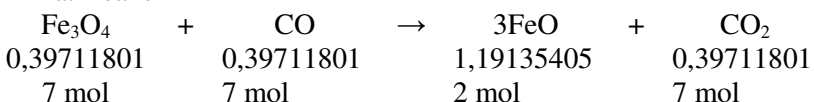


Reaksi gas CO₂ hasil reaksi 3 dengan C batubara

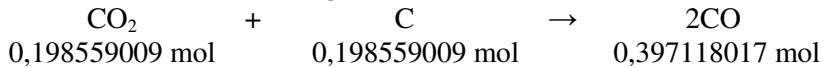


II. Reaksi Reduksi Fe₃O₄

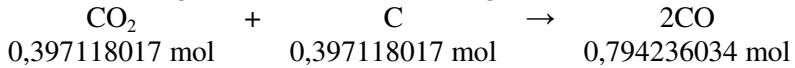
a. Reaksi 1



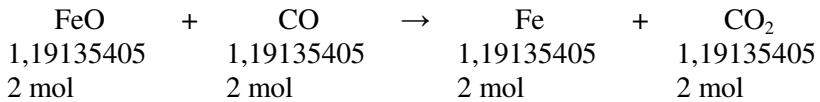
CO₂ hasil reaksi dekomposisi batu kapur yang dibutuhkan untuk bereaksi dengan C batu bara



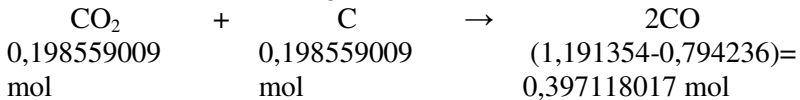
Reaksi gas CO₂ hasil reaksi 2 dengan C batubara



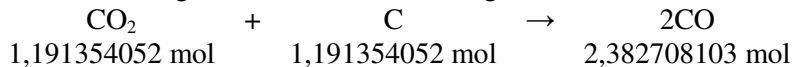
a. Reaksi 2



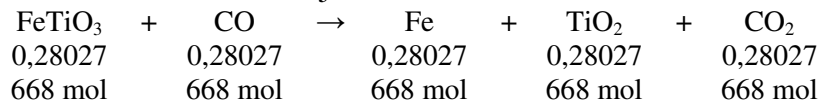
CO₂ hasil reaksi dekomposisi batu kapur yang dibutuhkan untuk bereaksi dengan C batu bara



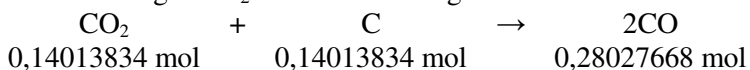
Reaksi gas CO₂ hasil reaksi 2 dengan C batubara



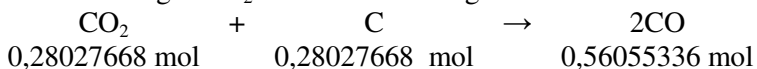
c. Reaksi Reduksi FeTiO₃



Reaksi gas CO₂ hasil reaksi dengan C batubara



Reaksi gas CO₂ hasil reaksi 2 dengan C batubara



Perhitungan Kebutuhan Batubara

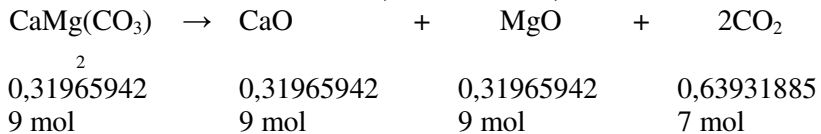
$$\begin{aligned} \text{Total mol C} &= 0,034020833 + 0,068041667 + 0 + 0,136083333 + \\ &\quad 0,068041667 + 0,40825 + 0,198559009 + \\ &\quad 0,397118017 + 0,198559009 + 1,191354052 + \\ &\quad 0,14013834 + 0,28027668 \\ &= 3,120442606 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Massa C yang dibutuhkan} &= \text{total mol C} \times \text{Ar C} \\ &= 3,120442606 \times 12,0 = \\ &37,44531127 \text{ gram}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Massa batubara yang dibutuhkan} &= \frac{1}{42,35\%} \times \text{massa C} \\ &= \frac{1}{42,35\%} \times 37,44531127 \\ &= 88,41868069 \text{ gram}\end{aligned}$$

Perhitungan Kebutuhan Kapur

$$\begin{aligned}\text{Total CO}_2 \text{ yang dibutuhkan} &= 0,034020833 + 0 + 0,068041667 + \\ &0,198559009 + 0,198559009 + \\ &0,14013834 = 0,639318857 \text{ mol}\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\text{Massa dolomit} &= \text{mol CaMg(CO}_3)_2 \times \text{Mr CaMg(CO}_3)_2 \\ &= 0,319659429 \times 184,397 = 58,91323269 \\ &\text{gram}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\% \text{Wt Dolomit} &= \frac{\text{Mr CaMg(CO}_3)_2}{\left(\frac{1}{18,015\%} \times \text{Ar Ca}\right) + \left(\frac{1}{14,6135\%} \times \text{Ar Mg}\right)} \times 100\% \\ &= \frac{58,91323269}{\left(\frac{1}{18,015\%} \times 40,078\right) + \left(\frac{1}{14,6135\%} \times 24,305\right)} \times 100\% \\ &= 47,01923305 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Massa batu kapur yang dibutuhkan} &= \frac{1}{47,02\%} \times \text{massa dolomite} \\ &= \frac{1}{47,02\%} \times 58,9132326 \\ &= 125,2960307 \text{ gram}\end{aligned}$$

Maka Perbandingan massa yang diperoleh adalah :

$$\begin{array}{ccccc}\text{Pasir Besi} & : & \text{Batu Bara} & : & \text{Batu Kapur Dolomit} \\ 200 & : & 88,42 & : & 125,3 \\ 1 & : & 0,442 & : & 0,626\end{array}$$

Perhitungan Neraca Massa Peleburan *Sponge Iron*

Berdasarkan pengujian XRD *sponge iron* terdapat fasa besi oksida. Sehingga dibutuhkan batubara untuk mereduksi besi oksida serta fluks SiO_2 untuk mengikat unsur pengotor yang terdapat pada *sponge iron*.

Hasil Pengujian XRD

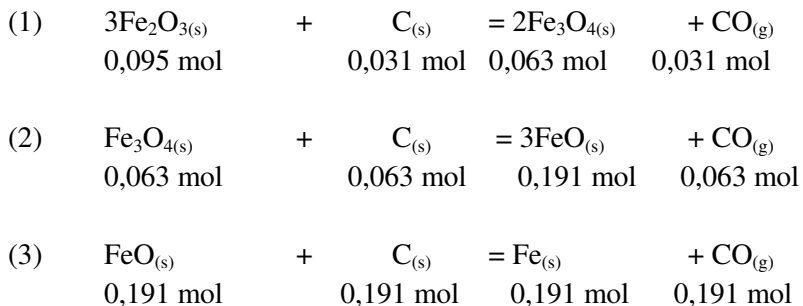
Fasa	%wt
Fe	14,2
Fe_2O_3	38,2
Fe_3O_4	46,2
FeTiO_3	7,28

Pada peleburan, *sponge iron* yang digunakan sebanyak 40 gram. Berdasarkan hasil tersebut maka mol yang didapat,

$$\begin{aligned} \text{Fe} &= 5,68 \text{ gram} & \frac{\text{Massa Fe}}{\text{Ar Fe}} &= 0,101 \text{ mol} \\ \text{Fe}_2\text{O}_3 &= 15,28 \text{ gram} & \frac{\text{Massa Fe}_2\text{O}_3}{\text{Mr Fe}_2\text{O}_3} &= 0,095 \text{ mol} \\ \text{Fe}_3\text{O}_4 &= 18,488 \text{ gram} & \frac{\text{Massa Fe}_3\text{O}_4}{\text{Mr Fe}_3\text{O}_4} &= 0,079 \text{ mol} \\ \text{FeTiO}_3 &= 2,91 \text{ gram} & \frac{\text{Massa FeTiO}_3}{\text{Mr FeTiO}_3} &= 0,019 \text{ mol} \end{aligned}$$

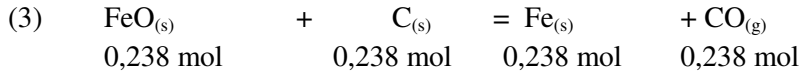
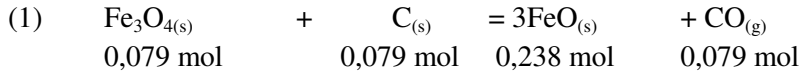
(i) Perhitungan kebutuhan batubara

1. Reaksi pada Fe_2O_3



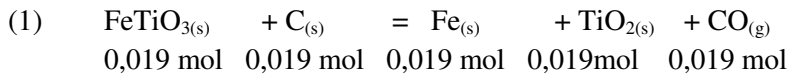
Jumlah unsur C yang dihasilkan = 0,031 mol

2. Reaksi pada Fe_3O_4



Jumlah unsur C yang dihasilkan = 0,079 mol

3. Reaksi pada FeTiO_3



Jumlah unsur C yang dihasilkan = 0,019 mol

Sehingga jumlah total unsur yang dibutuhkan sebanyak 0,130 mol atau 1,568 gram

$$\begin{aligned} \text{Massa batubara yang dibutuhkan} &= \frac{1}{42,35\%} \times \text{massa C} \\ &= \frac{1}{42,35\%} \times 1,568 \\ &= 3,703 \text{ gram} \end{aligned}$$

Massa batubara ditambahkan safety factor sebesar 25%, sehingga kebutuhan batubara untuk melebur sebanyak 4,629 gram.

(ii) Perhitungan Kebutuhan Fluks

Mol TiO_2 dari reduksi ilmenite = mol fluks SiO_2

Mol $\text{TiO}_2 = 0,019 \text{ mol}$

Mol $\text{SiO}_2 = 0,019 \text{ mol}$

Massa fluks SiO_2 sebanyak 1,15 gram

Maka Perbandingan Massa yang diperoleh sebesar

<i>Sponge iron</i>	:	Batubara	:	Fluks SiO_2
1	:	0,115	:	0,0288

Perhitungan Neraca Panas Peleburan *Sponge Iron*

Berdasarkan pengujian EDX dan XRD diketahui bahwa komposisi senyawa yang terdapat pada *sponge iron* sebagai berikut.

Mol *sponge iron* yang terbentuk.

Senyawa	Mol
Fe ₃ O ₄	0,143
FeO	0,429
Fe	0,550
TiO ₂	0,019
Al ₂ O ₃	0,008
MgO	0,069
FeTiO ₃	0,019
Fe ₂ O ₃	0,095
SiO ₂	0,044

Berdasarkan persamaan :

$$\Delta H = \epsilon H_{\text{produk}} - \epsilon H_{\text{reaktan}} \text{ dan,}$$

$$H = n \int C_p dT$$

Entalphy pembentukan senyawa pada 298 K

Senyawa	$\Delta H_f(\text{kJ/mol})$
Fe ₃ O ₄	-1118
FeO	-272
Fe	0
TiO ₂	-944,7
SiO ₂	-910,86
Al ₂ O ₃	-1669,8
MgO	-601,6
CO ₂	-393,509
CO	-110,525
C	0
Fe ₂ O ₃	-824,2
CaO	-635,09

Kalor specific (Cp) dari unsur dan senyawa
 $(Cp = a + bT + cT^{-2})$

Kalor Spesifik (cal/degremol)				
Senyawa	a	bT	Ct ⁻²	Temperatur (K)
Fe ₃ O ₄	41,17	0,01882	-979500	1065
FeO	12,26	0,001492	-76200	1173
Fe	4,13	0,00638		1041
Fe	6,12	0,00336		1179
Fe	8,4			1674
TiO ₂	11,81	0,00754	-41900	713
SiO ₂	10,87	0,008712	-241200	848
SiO ₂	10,95	0,0055		1873
Al ₂ O ₃	22,08	0,008971	-522500	1973
MgO	10,86	0,001197	-208700	2073
CO ₂	10,34	0,00274	-195500	1200
CO	6,6	0,0012		2500
FeTiO ₃	177,857	0,540476	2,9E+07	4273
Fe ₂ O ₃	24,73	0,01604	-423400	1097
C	2,673	0,002617	-116900	1373
CaTiSiO ₅	358,276	0,000114488	-45276	1683
CaO	10	0,00484	-108000	1173
CaMgSi ₂ O ₆	54,46	0,005746	-1500000	1573

- Temperatur yang digunakan sebesar 1943 K
- Temperatur awal sebesar 298 K
- Temperatur reaksi Fe₃O₄ sebesar 973 K
- Temperatur reaksi FeO sebesar 983 K

Berdasarkan data tersebut dan persamaan maka,

(i) Panas pembentukan untuk reaksi :

(1) $\text{Fe}_3\text{O}_{4(s)} + \text{C}_{(s)} > 3\text{FeO}_{(l)} + \text{CO}_{(g)}$	$\Delta H = 176,08 \text{ kJ}$
(2) $3\text{Fe}_2\text{O}_{3(s)} + \text{C}_{(s)} = 2\text{Fe}_3\text{O}_{4(l)} + \text{CO}_{(g)}$	$\Delta H = 125,58 \text{ kJ}$
(3) $\text{FeO}_{(s)} + \text{C}_{(s)} = \text{Fe}_{(l)} + \text{CO}_{(g)}$	$\Delta H = 141,81 \text{ kJ}$
(4) $\text{FeTiO}_{3(s)} + \text{C}_{(s)} = \text{Fe}_{(s)} + \text{TiO}_{2(l)} + \text{CO}_{(g)}$	$\Delta H = 1,90 \text{ kJ}$
(5) $\text{CaO}_{(s)} + \text{TiO}_{2(s)} + \text{SiO}_{2(s)} = \text{CaTiSiO}_{5(l)}$	$\Delta H = 439,77 \text{ kJ}$
(6) $\text{CaO}_{(s)} + \text{MgO}_{(s)} + 2\text{SiO}_{2(s)} = \text{CaMgSi}_2\text{O}_{6(l)}$	$\Delta H = 21,41 \text{ kJ}$
(7) $\text{Al}_2\text{O}_{3(s)} = \text{Al}_2\text{O}_{3(l)}$	$\Delta H = 0,21 \text{ kJ}$
(8) $\text{Fe}_{(s)} = \text{Fe}_{(l)}$	$\Delta H = 19,02 \text{ kJ}$
(9) $\text{MgO}_{(s)} = \text{MgO}_{(l)}$	$\Delta H = 5,709 \text{ KJ}$
(10) $\text{SiO}_{2(s)} = \text{SiO}_{2(l)}$	$\Delta H = 4,16 \text{ KJ}$
(11) $\text{TiO}_{2(s)} = \text{TiO}_{2(l)}$	$\Delta H = 2,67 \text{ KJ}$
(12) $\text{CaO}_{(s)} = \text{CaO}_{(l)}$	$\Delta H = 1,11 \text{ KJ}$

(ii) Panas Reaksi

(13) $1/3\text{Fe}_3\text{O}_{4(s)} + \text{C}_{(s)} > 3/4\text{Fe}_{(l)} + \text{CO}_{(g)}$	$\Delta H = 25,27 \text{ kJ}$
(14) $\text{FeO}_{(s)} + \text{C}_{(g)} > \text{Fe}_{(l)} + \text{CO}_{(g)}$	$\Delta H = 149,56 \text{ kJ}$

Sehingga total panas yang dibutuhkan sebesar 1119,96 kJ.

Panas yang dihasilkan dari *electric arc furnace*

Arus (A)	Voltage (V)	Waktu (Sekon)	Energi (Kj)
140	16,2	360	816,48
160			933,12
180			1049,76
200			1166,4

Lampiran B (Hasil Uji XRD)

Hasil Uji XRD Pasir Besi



LABORATORIUM PENGOLAHAN MINERAL DAN MATERIAL
JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

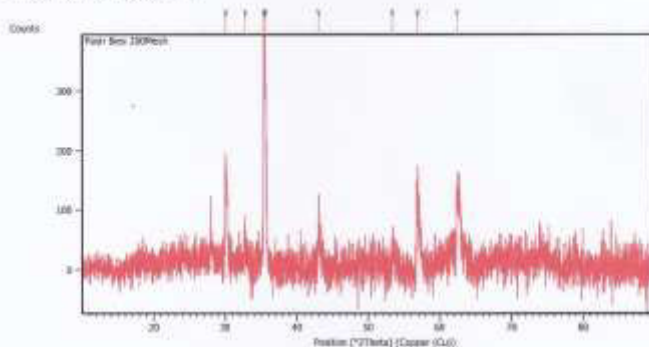
Telp. (031) 5943442, 081222842373, Email : askgging@mat-eng.its.ac.id

Surabaya, 22 September 2016

No : 10/LTPMM/IX/2016
Hal : Laporan Hasil Pengujian XRD
Lampiran : -

LAPORAN HASIL PENGUJIAN

Berdasarkan permohonan pengujian yang diberikan, maka telah dilakukan pengujian X-Ray Diffractometer (XRD) untuk sampel pasir besi Sukabumi. Berikut ini ialah hasil pengujian XRD sampel pasir besi Sukabumi.



Gambar 1. Hasil pengujian X-Ray Diffractometer (XRD) sampel pasir besi Sukabumi

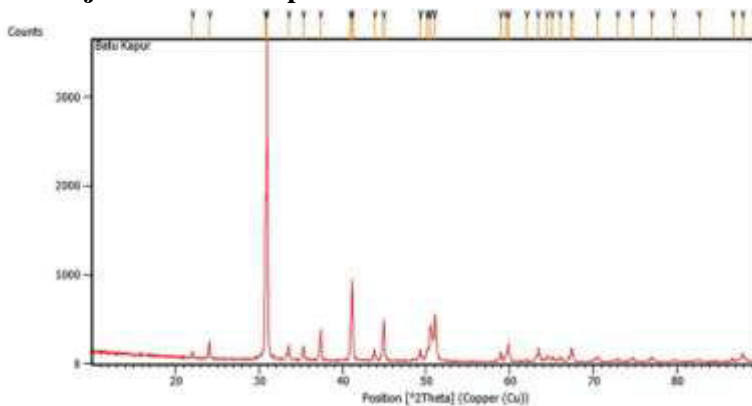
Dari grafik di atas, maka diperoleh senyawa – senyawa yang mungkin ada di dalam pasir besi Sukabumi. Tabel 1 menunjukkan senyawa – senyawa tersebut.

Tabel 1. Hasil analisa kandungan senyawa yang mungkin ada di dalam pasir besi

No	Senyawa	Formula	Wt %
1	Magnetite	Fe_3O_4	46,065
2	Maghemite	$Fe_2O_3 (\beta)$	16,33
3	Ilmenite	$FeTiO_3$	21,273
4	Magnesium oksida	MgO	4,588
5	Aluminium oksida	Al_2O_3	5,026
6	Silikon oksida	SiO_2	6,718

Sif

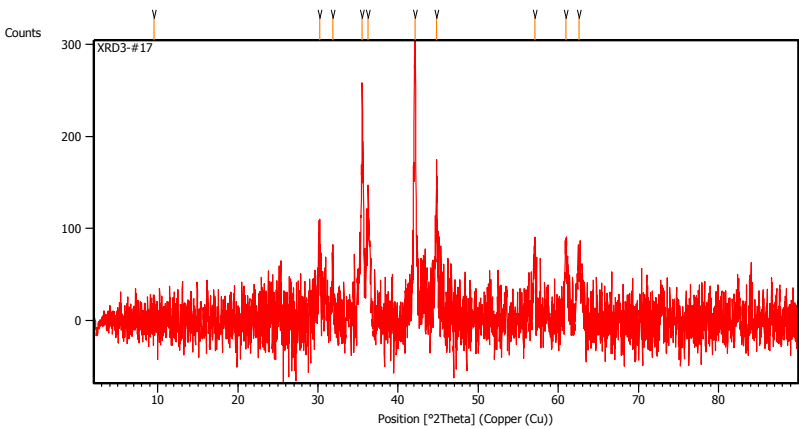
Hasil Uji XRD Batu Kapur



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
22.0550	73.23	0.0669	4.03040	2.03
24.0961	161.29	0.1004	3.69343	4.47
30.7582	1687.90	0.1004	2.90695	46.75
30.9449	3610.70	0.1004	2.88984	100.00
33.5597	129.23	0.1673	2.67042	3.58
35.3255	156.43	0.1004	2.54088	4.33
37.3633	330.77	0.0669	2.40685	9.16
40.8910	285.95	0.1004	2.20699	7.92
41.1275	917.37	0.1020	2.19303	25.41
41.2581	371.23	0.0612	2.19182	10.28
43.7981	121.38	0.1224	2.06530	3.36
44.9393	460.15	0.1224	2.01547	12.74
45.0573	228.55	0.0612	2.01546	6.33
49.2930	111.62	0.0816	1.84716	3.09
50.1110	131.89	0.2040	1.81891	3.65
50.4740	333.92	0.1632	1.80667	9.25
51.0180	496.42	0.1428	1.78868	13.75

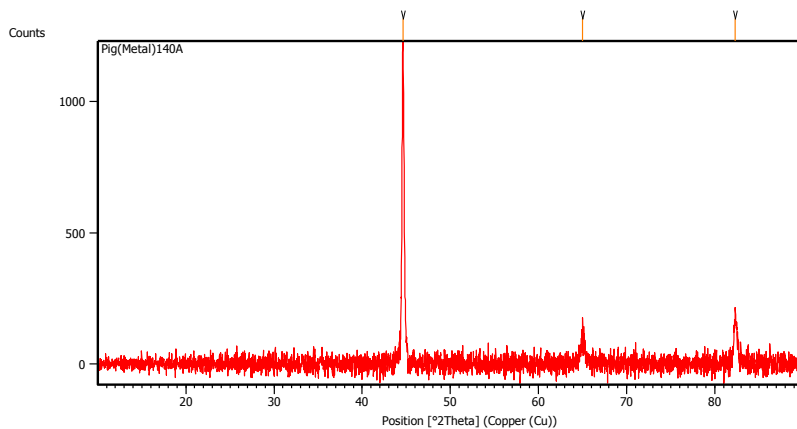
Hasil Uji XRD *Sponge Iron*



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
9.5047	13.16	0.9446	9.30531	4.53
30.1810	84.78	0.2362	2.96122	29.15
31.8666	40.35	0.4723	2.80833	13.87
35.5122	230.59	0.1968	2.52795	79.27
36.2542	110.06	0.3936	2.47789	37.84
42.1060	290.89	0.1968	2.14608	100.00
44.8270	149.76	0.1378	2.02193	51.48
57.0851	85.34	0.2362	1.61348	29.34
60.9542	76.90	0.2362	1.52000	26.44
62.5952	59.44	0.4723	1.48405	20.43

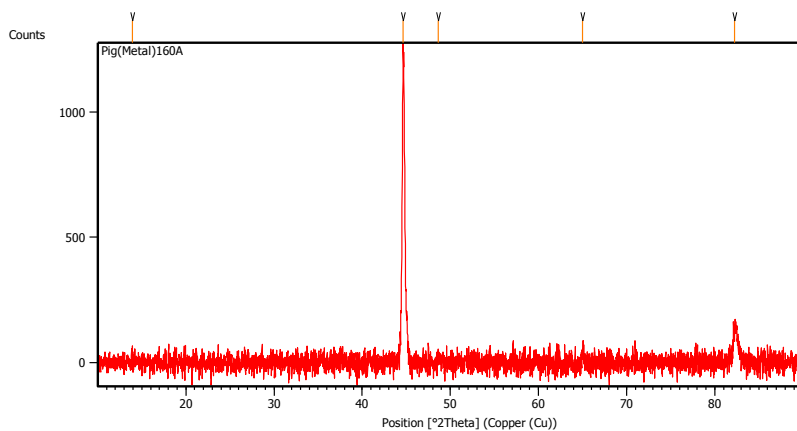
Hasil Uji XRD *Pig Iron 140 A*



Peak List:

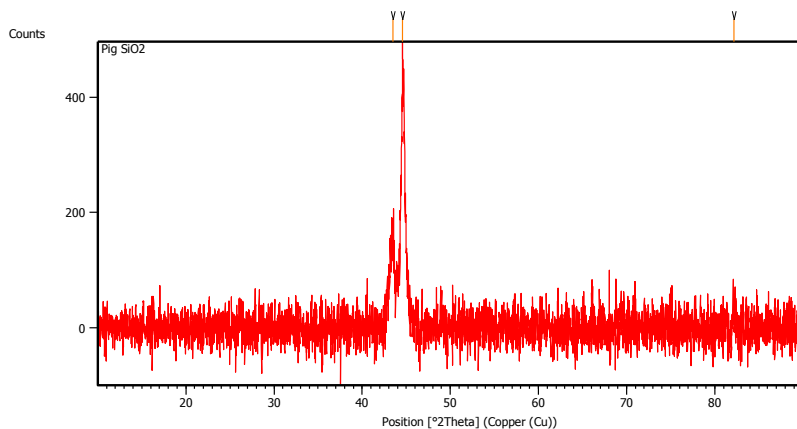
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.6319	1236.68	0.1004	2.03031	100.00
64.9703	107.16	0.3346	1.43542	8.66
82.3313	204.45	0.2007	1.17121	16.53

Hasil Uji XRD *Pig Iron 160 A*



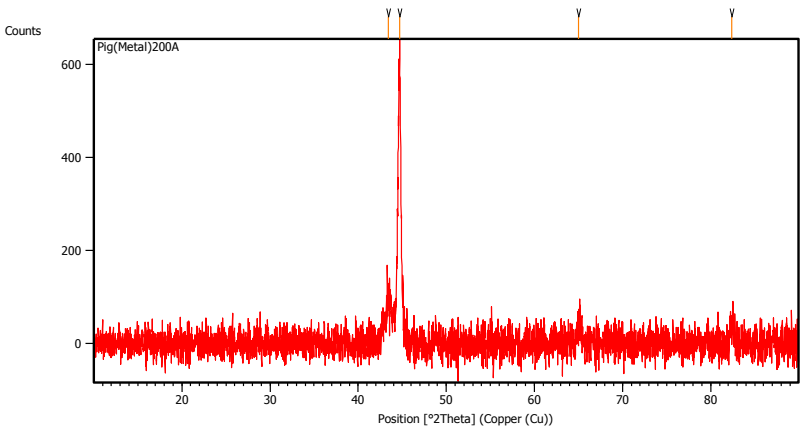
Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
13.9254	42.91	0.2007	6.35966	3.52
44.6456	1218.99	0.1171	2.02972	100.00
48.6139	39.27	0.5353	1.87291	3.22
65.0153	72.57	0.5353	1.43454	5.95
82.2490	125.58	0.4015	1.17218	10.30

Hasil Uji XRD *Pig Iron 180 A***Peak List:**

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.4941	159.85	0.4684	2.08075	35.73
44.5841	447.37	0.2007	2.03238	100.00
82.2141	49.24	0.5353	1.17259	11.01

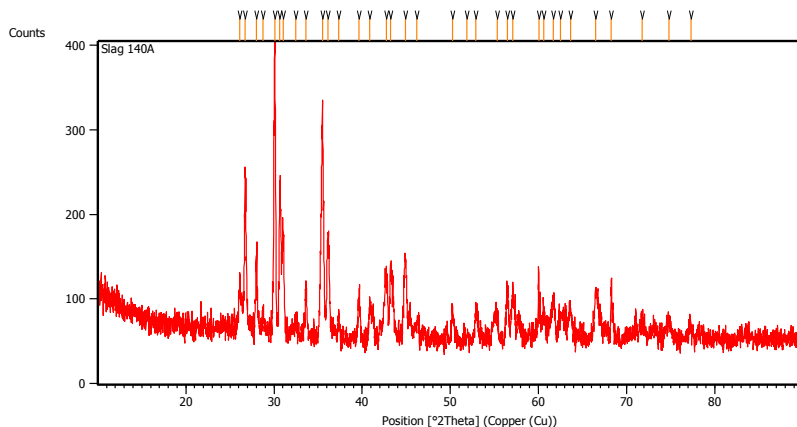
Hasil Uji XRD *Pig Iron 200 A*



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.4576	90.15	0.4015	2.08241	14.65
44.7017	615.42	0.2676	2.02730	100.00
65.0337	31.49	0.4684	1.43418	5.12
82.3867	81.95	0.5353	1.17057	13.32

Hasil Uji XRD *Slag 140 A*

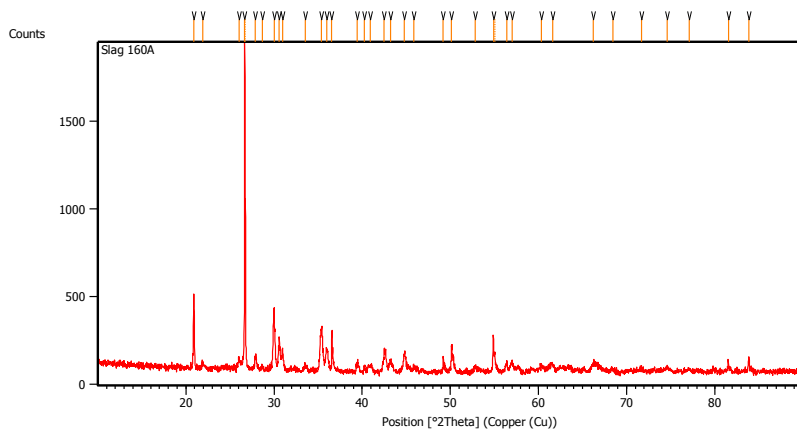


Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
26.1423	63.95	0.1338	3.40880	19.08
26.7173	191.82	0.0836	3.33673	57.23
28.0086	76.90	0.1673	3.18576	22.94
28.7657	27.43	0.2676	3.10361	8.18
30.0736	335.20	0.0669	2.97155	100.00
30.6601	165.15	0.1673	2.91603	49.27
31.0333	115.10	0.2007	2.88181	34.34
32.4840	14.57	0.5353	2.75635	4.35
33.6081	59.90	0.1673	2.66669	17.87
35.5151	275.46	0.1004	2.52774	82.18
36.0884	120.54	0.2676	2.48890	35.96
37.3520	30.72	0.2007	2.40755	9.16
39.6380	54.64	0.1673	2.27381	16.30
40.8835	43.29	0.2007	2.20737	12.91
42.7468	73.54	0.3346	2.11537	21.94
43.2105	88.64	0.1004	2.09374	26.44
44.8899	98.35	0.2342	2.01924	29.34
46.2101	19.23	0.4015	1.96458	5.74
50.2893	32.23	0.2676	1.81437	9.62

51.9116	8.30	0.2007	1.76143	2.48
52.9182	34.42	0.2676	1.73027	10.27
55.3096	32.71	0.6022	1.66099	9.76
56.4755	58.01	0.2676	1.62944	17.31
57.0801	52.86	0.2676	1.61360	15.77
60.0342	82.13	0.0816	1.53980	24.50
60.5998	35.13	0.2007	1.52804	10.48
61.7040	46.50	0.3346	1.50332	13.87
62.5258	27.04	0.5353	1.48553	8.07
63.6161	37.04	0.3346	1.46267	11.05
66.4614	55.95	0.2342	1.40679	16.69
68.2805	73.75	0.1020	1.37254	22.00
71.7734	16.99	0.4015	1.31518	5.07
74.8110	17.38	0.4015	1.26913	5.19
77.3096	13.15	0.4015	1.23424	3.92

Hasil Uji XRD *Slag 160 A*

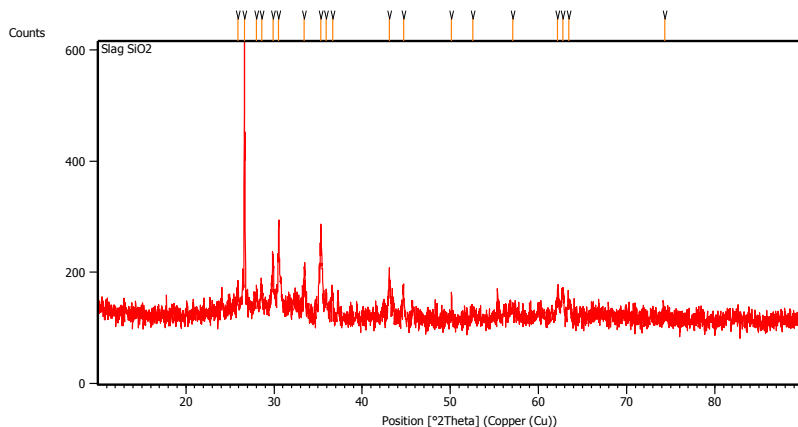


Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
20.8920	413.56	0.1171	4.25208	22.43
21.9000	33.70	0.2676	4.05857	1.83

26.0185	54.43	0.1004	3.42473	2.95
26.6668	1843.99	0.0816	3.34016	100.00
26.7507	903.06	0.0408	3.33815	48.97
27.8847	67.76	0.1632	3.19699	3.67
28.6947	17.11	0.2448	3.10856	0.93
30.0011	345.76	0.1224	2.97610	18.75
30.5542	152.50	0.1632	2.92348	8.27
30.9696	112.96	0.1632	2.88520	6.13
33.5803	29.98	0.3264	2.66662	1.63
35.4063	239.79	0.3672	2.53316	13.00
35.9605	131.44	0.2856	2.49539	7.13
36.5555	225.32	0.0612	2.45613	12.22
39.4434	51.11	0.3264	2.28270	2.77
40.2282	28.65	0.2040	2.23995	1.55
40.9257	32.44	0.4896	2.20337	1.76
42.5104	138.89	0.1632	2.12483	7.53
43.1934	68.86	0.2448	2.09280	3.73
44.7922	93.14	0.2856	2.02174	5.05
45.8809	32.20	0.2448	1.97627	1.75
49.1952	92.88	0.0612	1.85060	5.04
50.1516	149.13	0.0816	1.81753	8.09
52.8031	32.33	0.3264	1.73233	1.75
54.8917	212.35	0.0816	1.67126	11.52
55.0681	116.97	0.1020	1.67046	6.34
56.4025	60.90	0.1224	1.63002	3.30
57.0204	58.61	0.3264	1.61382	3.18
60.3505	25.90	0.3264	1.53249	1.40
61.6013	28.21	0.3264	1.50434	1.53
66.2199	42.05	0.4080	1.41016	2.28
68.4226	17.29	0.4896	1.37004	0.94
71.6851	15.96	0.4896	1.31549	0.87
74.5890	21.38	0.6528	1.27131	1.16
77.1217	14.26	0.4080	1.23575	0.77
81.5439	53.86	0.1224	1.17954	2.92
83.8763	82.31	0.1428	1.15258	4.46

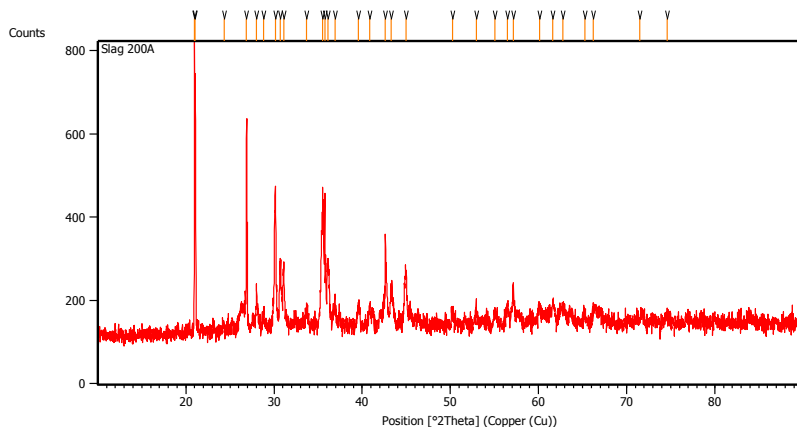
Hasil Uji XRD *Slag* 180 A



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
25.9131	37.90	0.2007	3.43843	7.92
26.6324	478.66	0.0836	3.34717	100.00
27.9766	29.60	0.3346	3.18934	6.18
28.5989	43.01	0.2007	3.12133	8.98
29.8705	95.44	0.1673	2.99129	19.94
30.5297	143.33	0.1338	2.92819	29.94
33.4429	82.31	0.1673	2.67948	17.20
35.3120	140.26	0.1338	2.54182	29.30
35.9378	44.91	0.2007	2.49898	9.38
36.6497	37.59	0.2007	2.45206	7.85
43.0898	83.51	0.1673	2.09933	17.45
44.6802	48.54	0.1338	2.02823	10.14
50.1428	51.14	0.0612	1.81783	10.68
52.5852	13.63	0.4684	1.74044	2.85
57.0691	14.02	0.8029	1.61389	2.93
62.1879	45.02	0.2007	1.49278	9.40
62.7673	41.49	0.2007	1.48039	8.67
63.4407	25.69	0.3346	1.46629	5.37
74.3051	8.51	0.6691	1.27651	1.78

Hasil Uji XRD *Slag 200 A*



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
20.9760	652.92	0.0612	4.23173	100.00
21.0627	560.04	0.0836	4.21798	85.77
24.3196	17.95	0.2007	3.65999	2.75
26.8833	520.10	0.0502	3.31650	79.66
28.0133	97.02	0.1004	3.18524	14.86
28.7890	35.36	0.2007	3.10116	5.42
30.1541	326.61	0.0836	2.96380	50.02
30.7374	138.96	0.1506	2.90887	21.28
31.1158	140.70	0.1338	2.87436	21.55
33.6808	49.04	0.2007	2.66109	7.51
35.5103	292.80	0.2342	2.52808	44.84
35.7672	328.54	0.0502	2.51051	50.32
36.0872	154.36	0.2007	2.48898	23.64
36.9224	59.31	0.2007	2.43457	9.08
39.6031	46.63	0.2676	2.27574	7.14
40.8342	47.84	0.2007	2.20993	7.33
42.6271	184.11	0.1004	2.12104	28.20
43.3151	77.70	0.1338	2.08893	11.90
44.9667	117.50	0.3011	2.01597	18.00
50.2474	22.96	0.2007	1.81579	3.52

52.9417	40.43	0.2676	1.72956	6.19
55.0459	32.29	0.3346	1.66832	4.95
56.4985	49.50	0.2007	1.62883	7.58
57.1475	73.23	0.2676	1.61186	11.22
60.0985	45.10	0.2007	1.53958	6.91
61.6317	49.69	0.2007	1.50491	7.61
62.7389	36.90	0.4015	1.48099	5.65
65.2632	22.27	0.4015	1.42969	3.41
66.2439	31.92	0.4015	1.41088	4.89
71.5183	11.11	0.5353	1.31924	1.70
74.6351	19.52	0.4015	1.27169	2.99

Referensi PDF Card

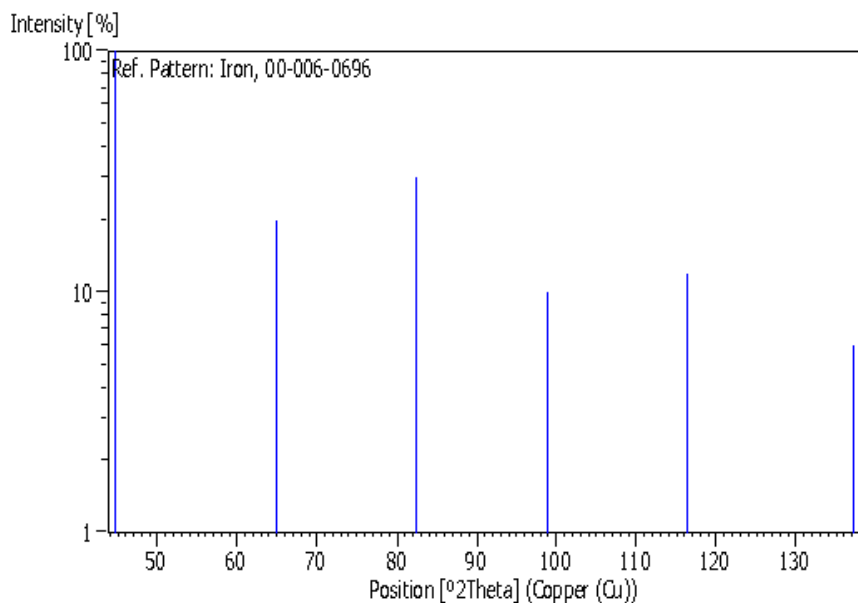
Fe (Iron)

Reference code: 00-006-0696
Mineral name: Iron, syn
Compound name: Iron
Common name: bainite, ferrite, ledkunitite
Empirical formula: Fe
Chemical formula: Fe

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]
				<u>I [%]</u>	
1	1	1	0	2.02680	44.674
				100.0	
2	2	0	0	1.43320	65.023
				20.0	
3	2	1	1	1.17020	82.335
				30.0	
4	2	2	0	1.01340	98.949
				10.0	
5	3	1	0	0.90640	116.390
				12.0	
6	2	2	2	0.82750	137.144
				6.0	

Stick Pattern



Fe (Iron)

Reference code: 01-089-4186

Mineral name: Iron, delta, ferrite, δ -Fe

Compound name: Iron

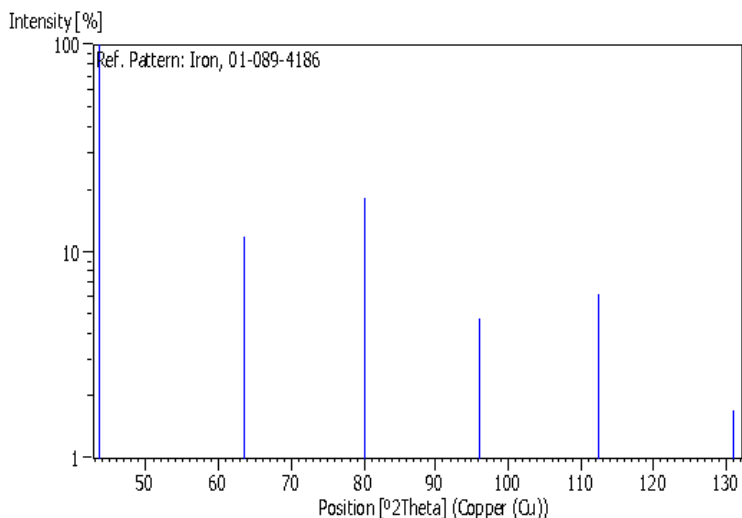
Empirical formula: Fe

Chemical formula: Fe

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	2.07290	43.629	100.0
2	2	0	0	1.46580	63.406	11.9
3	2	1	1	1.19680	80.127	18.2
4	2	2	0	1.03640	96.017	4.7
5	3	1	0	0.92700	112.395	6.2
6	2	2	2	0.84630	131.065	1.7

Stick Pattern



FeTiO₃ (Ilmenite)

Reference code: 00-002-0880

Mineral name: Ilmenite

Compound name: Iron Titanium Oxide

Empirical formula: FeO₃Ti

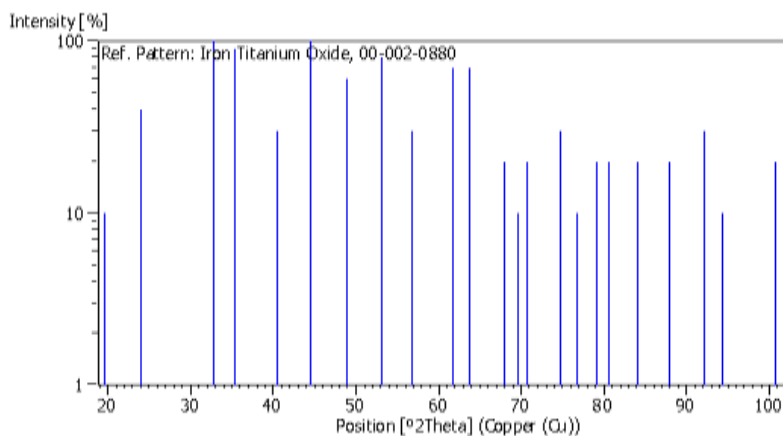
Chemical formula: Fe ₊₂TiO₃

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]
				I [%]	
1	0	0	3	4.50000	19.713
				10.0	
2	0	1	2	3.70000	24.033
				40.0	

3	1	0	4	2.73000	32.778
				100.0	
4	1	1	0	2.53000	35.452
				90.0	
5	1	1	3	2.23000	40.416
				30.0	
6				2.03000	44.600
				100.0	
7	0	2	4	1.86000	48.930
				60.0	
8	1	1	6	1.72000	53.212
				80.0	
9	1	2	2	1.62000	56.783
				30.0	
10	2	1	4	1.50000	61.799
				70.0	
11	3	0	0	1.46000	63.687
				70.0	

Stick Pattern



Magnetite(Fe₃O₄)

Reference code:

01-076-7165

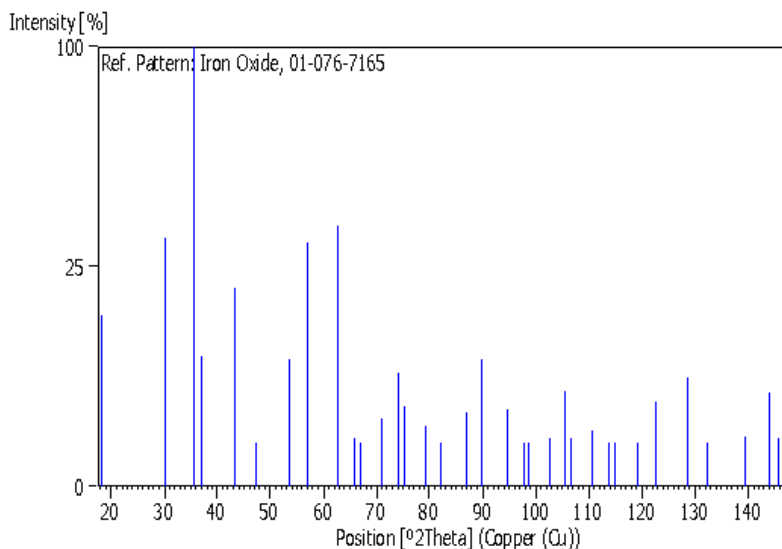
Mineral name:

Magnetite

Compound name:	Iron Oxide
Common name:	Iron diiron(III) oxide
Empirical formula:	Fe ₃ O ₄
Chemical formula:	Fe ₃ O ₄

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]
<u>I [%]</u>					
1	1	1	1	4.83620	18.330
15.1					
2	2	2	0	2.96160	30.152
32.0					
3	3	1	1	2.52560	35.516
100.0					
4	2	2	2	2.41810	37.151
8.8					
5	4	0	0	2.09420	43.163
20.4					
6	3	3	1	1.92170	47.262
0.1					
7	4	2	2	1.70990	53.551
8.3					



Maghemite (Fe₂O₃)

Reference code: 01-076-3169

Mineral name: Maghemite-Q, syn

Compound name: Iron Oxide

Common name: γ-Fe₂O₃, Iron(III) oxide

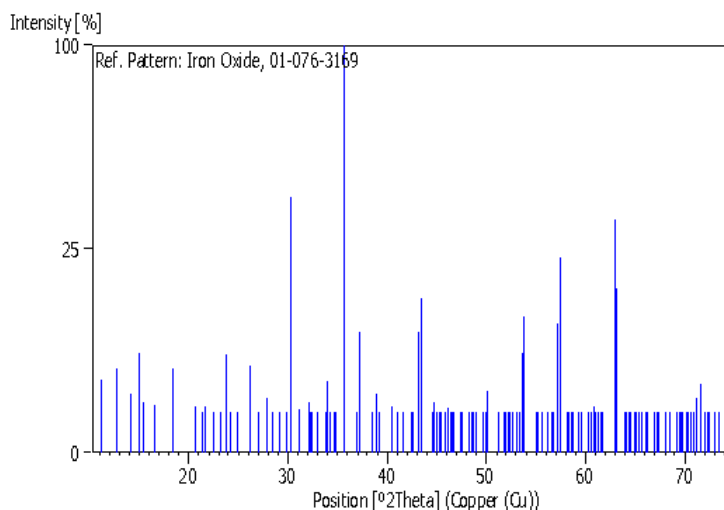
Empirical formula: Fe₂O₃

Chemical formula: Fe₂O₃

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]
I [%]					
28	2	2	0	2.95270	30.245
39.2					
29	2	0	6	2.95270	30.245
39.2					
30	2	2	2	2.86790	31.161

1.1					
31	2	2	3	2.78310	32.136
1.5					
32	2	1	6	2.78310	32.136
1.5					
33	1	1	8	2.77040	32.287
0.3					
34	3	0	1	2.76050	32.406
0.2					
35	2	0	7	2.71850	32.921
0.4					
36	3	0	2	2.71180	33.005
0.5					
37	1	0	9	2.64590	33.851
0.8					
38	3	0	3	2.63600	33.982
3.1					
39	3	1	0	2.63600	33.982
3.1					
40	3	1	1	2.62040	34.191
0.5					
41	2	1	7	2.58440	34.682
0.6					
42	3	1	2	2.57860	34.762
0.6					
43	1	1	9	2.52180	35.571
69.4					
44	3	1	3	2.51320	35.697
100.0					



Fe₂O₃ (Hematite)

Reference code:

00-024-0072

Mineral name:

Hematite

Compound name:

Iron Oxide

Empirical formula:

Fe₂O₃

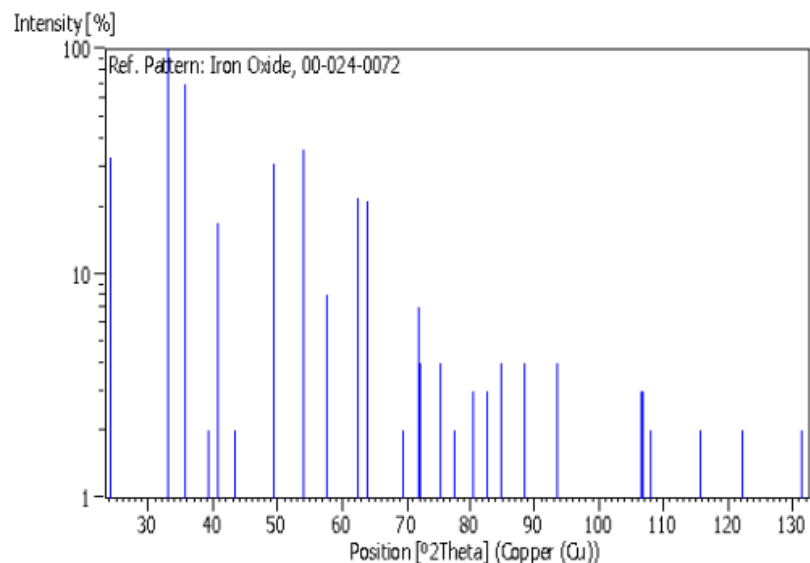
Chemical formula:

Fe₂O₃

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	1	2	3.68600	24.125	33.0
2	1	0	4	2.70300	33.115	100.0
3	1	1	0	2.51900	35.612	70.0
4	0	0	6	2.29500	39.223	2.0
5	1	1	3	2.20800	40.836	17.0
6	2	0	2	2.08000	43.473	2.0
7	0	2	4	1.84280	49.417	31.0
8	1	1	6	1.69660	54.005	36.0
9	1	2	2	1.60130	57.508	8.0
10	0	1	8	1.60130	57.508	8.0
11	2	1	4	1.48730	62.385	22.0
12	3	0	0	1.45430	63.966	21.0

Stick Pattern



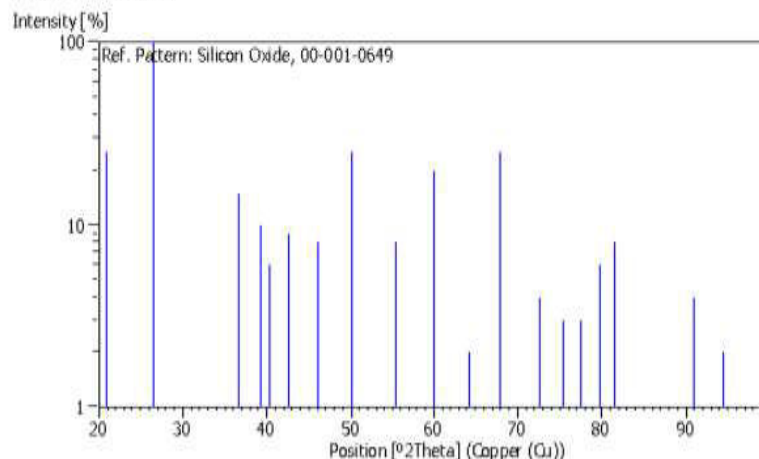
SiO₂ (Quartz)

Reference code:	00-001-0649
Mineral name:	Quartz
Compound name:	Silicon Oxide
Empirical formula:	O ₂ Si
Chemical formula:	SiO ₂

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	0	0	4.25000	20.885	25.0
2	1	0	1	3.35000	26.587	100.0
3	1	1	0	2.45000	36.650	15.0
4	1	0	2	2.29000	39.312	10.0
5	1	1	1	2.23000	40.416	6.0
6	2	0	0	2.12000	42.612	9.0
7	2	0	1	1.97000	46.035	8.0
8	1	1	2	1.82000	50.079	25.0
9	1	0	3	1.66000	55.296	8.0
10	2	1	1	1.54000	60.026	20.0
11	1	1	3	1.45000	64.179	2.0
12	2	1	2	1.38000	67.861	25.0
13	1	0	4	1.30000	72.675	4.0
14	3	0	2	1.26000	75.374	3.0
15	2	2	0	1.23000	77.549	3.0
16	2	1	3	1.20000	79.870	6.0
17	1	1	4	1.18000	81.506	8.0
18	3	1	1	1.16000	83.219	1.0
19	3	1	2	1.08000	90.998	4.0
20	1	0	5	1.05000	94.381	2.0
21	4	0	1	1.04000	95.578	1.0
22	2	2	3	1.02000	98.085	1.0

Stick Pattern



Mg₂SiO₄(Forsterit)

Reference code:	00-034-0189
Mineral name:	Forsterite, syn
Compound name:	Magnesium Silicate
Empirical formula:	Mg ₂ O ₄ Si
Chemical formula:	Mg ₂ SiO ₄

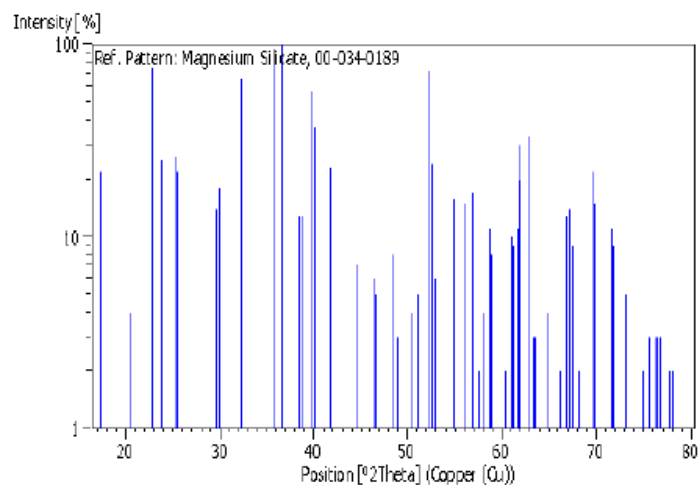
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	2	0	5.10210	17.367	22.0
2	0	1	1	4.30750	20.603	4.0
3	1	2	0	3.88120	22.895	76.0
4	1	0	1	3.72220	23.887	25.0
5	1	1	1	3.49600	25.458	26.0
6	0	2	1	3.47680	25.601	22.0
7	1	2	1	3.00650	29.691	14.0
8	2	0	0	2.99060	29.852	18.0
9	0	3	1	2.76530	32.348	66.0
10	1	3	1	2.50970	35.749	83.0
11	2	1	1	2.45670	36.547	100.0
12	1	4	0	2.34560	38.344	13.0
13	0	1	2	2.31500	38.871	13.0

14	2	2	1	2.26730	39.722	57.0
15	0	4	1	2.24700	40.097	37.0
16	1	1	2	2.15890	41.808	23.0
17	2	3	1	2.03030	44.593	7.0
18	0	3	2	1.94790	46.588	6.0
19	2	4	0	1.94070	46.771	5.0
20	0	5	1	1.87440	48.530	8.0
21	2	0	2	1.86080	48.908	3.0
22	3	2	0	1.85690	49.017	2.0
23	3	0	1	1.83860	49.532	1.0
24	2	1	2	1.82990	49.789	1.0
25	3	1	1	1.80900	50.405	4.0
26	1	5	1	1.78860	51.020	5.0
27	2	2	2	1.74830	52.284	73.0
28	0	4	2	1.73860	52.598	24.0
29	3	2	1	1.72940	52.900	6.0
30	1	4	2	1.66980	54.944	16.0
31	1	6	0	1.63470	56.227	15.0
32	3	3	1	1.61730	56.886	17.0
33	0	6	1	1.60080	57.527	2.0
34	2	5	1	1.58840	58.019	4.0
35	3	4	0	1.57080	58.732	11.0
36	0	1	3	1.56660	58.905	8.0
37	1	0	3	1.53230	60.359	2.0
38	1	1	3	1.51440	61.148	10.0
39	3	1	2	1.51110	61.296	9.0
40	2	4	2	1.50320	61.653	11.0
41	1	5	2	1.49900	61.845	20.0
42	4	0	0	1.49540	62.010	30.0
43	2	6	0	1.47800	62.823	33.0
44	1	2	3	1.46740	63.329	3.0
45	3	2	2	1.46380	63.503	3.0
46	0	3	3	1.43650	64.855	4.0
47	2	6	1	1.41110	66.170	2.0
48	1	3	3	1.39680	66.936	13.0
49	0	7	1	1.39300	67.143	14.0
50	3	3	2	1.39300	67.143	14.0
51	2	1	3	1.38740	67.451	9.0
52	2	5	2	1.37480	68.153	2.0
53	3	5	1	1.36570	68.670	1.0
54	2	2	3	1.35050	69.554	22.0
55	0	4	3	1.34640	69.796	15.0
56	4	3	1	1.31550	71.685	11.0
57	1	4	3	1.31310	71.836	9.0
58	3	6	0	1.29370	73.086	5.0
59	4	0	2	1.26610	74.948	2.0
60	2	7	1	1.26270	75.185	1.0

61	4	1	2	1.25610	75.649	3.0
62	0	5	3	1.25150	75.977	1.0
63	3	6	1	1.24780	76.242	3.0
64	4	4	1	1.24480	76.459	3.0
65	3	0	3	1.24110	76.729	3.0
66	3	1	3	1.23170	77.422	1.0
67	2	4	3	1.22760	77.730	2.0
68	3	5	2	1.22380	78.093	2.0
69	1	7	2	1.21600	78.613	1.0
70	1	8	1	1.20600	79.393	1.0

Stick Pattern



MgO (Periclase)

Reference code: 01-071-1176

Mineral name: Periclase

Compound name: Magnesium Oxide

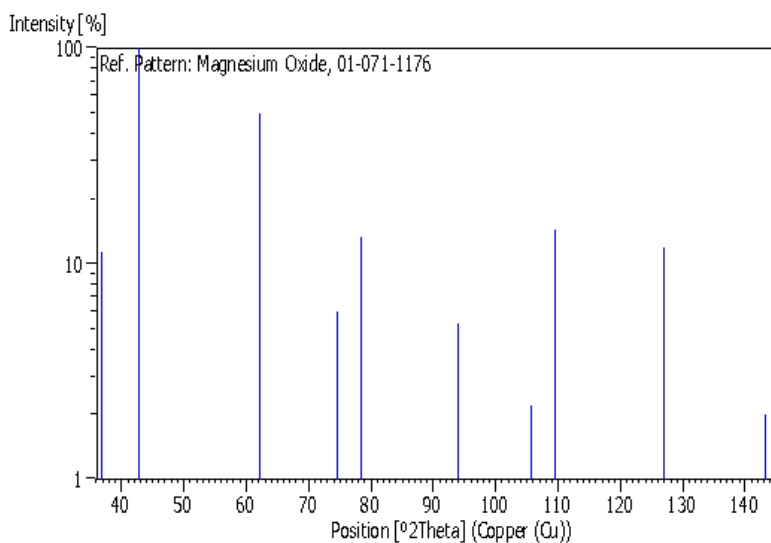
Empirical formula: MgO

Chemical formula: MgO

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]
				<u>I [%]</u>	
1	1	1	1	2.43470	36.889
				11.4	
2	2	0	0	2.10850	42.856
				100.0	
3	2	2	0	1.49090	62.218
				49.8	
4	3	1	1	1.27150	74.576
				6.0	
5	2	2	2	1.21730	78.513
				13.3	
6	4	0	0	1.05420	93.890
				5.3	
7	3	3	1	0.96740	105.548
				2.2	
8	4	2	0	0.94300	109.544
				14.4	
9	4	2	2	0.86080	126.982
				11.9	
10	5	1	1	0.81160	143.286
				2.0	

Stick Pattern



Dolomite (CaMg(CO₃)₂)

Reference code:

00-011-0078

Mineral name:

Dolomite

Compound name:
Carbonate

Calcium Magnesium

Empirical formula:

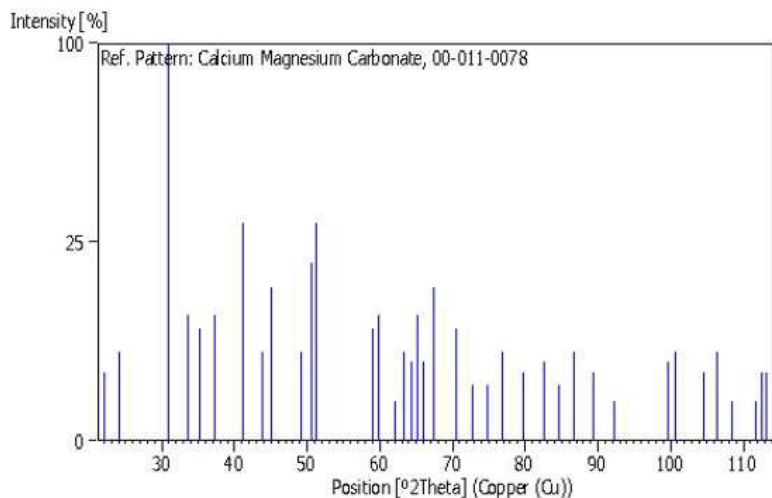
C₂CaMgO₆

Chemical formula:

CaMg (CO₃)₂

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	0	1	4.03000	22.039	3.0
2	0	1	2	3.69000	24.099	5.0
3	1	0	4	2.88600	30.961	100.0
4	0	0	6	2.67000	33.537	10.0
5	0	1	5	2.54000	35.308	8.0
6	1	1	0	2.40500	37.361	10.0
7	1	1	3	2.19200	41.148	30.0
8	0	2	1	2.06600	43.782	5.0
9	2	0	2	2.01500	44.950	15.0
10	0	2	4	1.84800	49.269	5.0
11	0	1	8	1.80400	50.554	20.0
12	1	1	6	1.78600	51.100	30.0
13	0	0	9	1.78100	51.254	30.0
14	2	1	1	1.56700	58.888	8.0
15	1	2	2	1.54500	59.812	10.0
16	1	0	10	1.49600	61.982	1.0
17	2	1	4	1.46500	63.445	5.0
18	2	0	8	1.44500	64.428	4.0
19	1	1	9	1.43100	65.135	10.0
20	1	2	5	1.41300	66.070	4.0
21	3	0	0	1.38900	67.362	15.0
22	0	0	12	1.33500	70.480	8.0
23	2	1	7	1.29700	72.870	2.0
24	0	2	10	1.26900	74.748	2.0
25	1	2	8	1.23800	76.956	5.0
26	2	2	0	1.20200	79.710	3.0
27	1	1	12	1.16800	82.524	4.0
28	3	1	2	1.14400	84.651	2.0
29	2	1	10	1.12300	86.618	5.0
30	2	2	6	1.09600	89.309	3.0
31	0	0	15	1.06800	92.316	1.0
32	4	0	4	1.00800	99.669	4.0
33	3	1	8	1.00100	100.623	5.0
34	1	0	16	0.97300	104.685	3.0
35	3	0	12	0.96200	106.399	5.0
36	2	3	2	0.94900	108.524	1.0
37	3	2	4	0.93000	111.845	1.0
38	1	2	14	0.92600	112.580	3.0
39	0	4	8	0.92300	113.140	3.0



CaTiSiO₅ (Titanite)

Reference code:

01-070-3393

Compound name:

Calcium Titanium Oxide Silicate

Common name:

titanite HP, syn

Empirical formula:

CaO₅SiTi

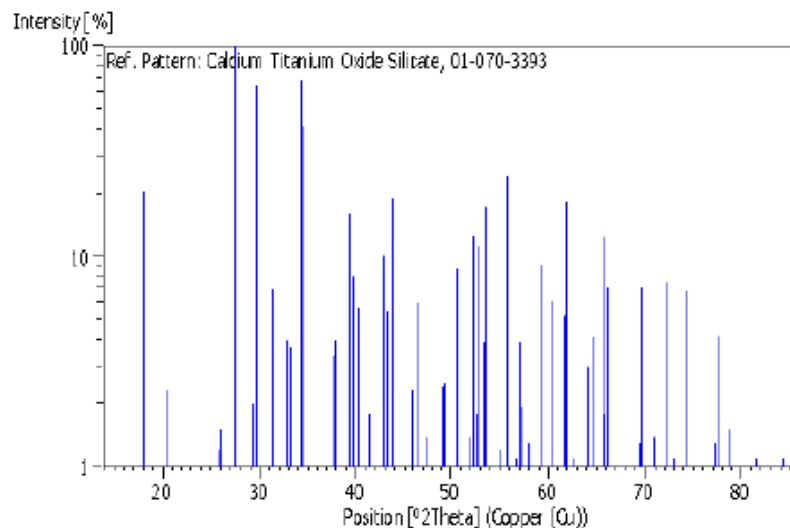
Chemical formula:

Ca (TiO) (SiO₄)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	0	1	5.99670	14.751	0.7
2	1	1	0	5.18770	17.078	0.5
3	0	1	1	4.93940	17.944	20.4
4	1	1	-1	4.75990	18.626	0.4
5	0	2	0	4.35540	20.374	2.3
6	1	2	0	3.61090	24.635	0.1
7	0	2	1	3.52400	25.252	0.1
8	2	0	-1	3.49080	25.496	0.5
9	1	2	-1	3.45700	25.750	1.2
10	1	1	1	3.41400	26.080	1.5
11	2	1	-1	3.24030	27.505	100.0
12	2	1	0	3.02760	29.479	2.0
13	0	0	2	2.99840	29.773	65.5
14	2	0	-2	2.84180	31.455	6.9
15	0	1	2	2.84180	31.455	6.9
16	2	2	-1	2.72390	32.654	4.0
17	2	1	-2	2.70160	33.133	3.7
18	1	3	0	2.64820	33.821	0.9
19	0	3	1	2.61340	34.285	68.2
20	1	2	-2	2.61340	34.285	68.2
21	2	2	0	2.59380	34.552	41.5
22	0	2	2	2.46970	36.345	0.2
23	2	0	1	2.45900	36.511	0.8
24	2	2	-2	2.38000	37.768	3.4
60	1	5	0	1.60200	54.512	0.2
69	0	5	1	1.57300	54.830	1.0
70	3	2	1	1.66940	54.958	0.5
71	1	5	-1	1.66570	55.090	1.2
72	0	3	3	1.64650	55.755	24.4
73	2	4	1	1.63030	56.393	0.9
74	4	2	-1	1.62040	56.768	1.1
75	4	2	-2	1.62040	56.768	1.1
76	4	0	-3	1.61440	56.998	3.9
77	4	0	0	1.61440	56.999	3.9
78	1	4	2	1.60670	57.296	1.9
79	2	1	-4	1.60670	57.296	1.9
80	1	2	3	1.60240	57.464	0.3
81	3	4	-1	1.59720	57.669	0.3
82	4	1	0	1.58740	58.059	1.3
83	4	1	-3	1.58740	58.059	1.3
84	1	1	-4	1.58360	58.212	0.3
85	1	5	1	1.57700	58.479	0.1
86	2	3	2	1.56350	59.039	0.7
87	2	5	-1	1.55580	59.229	9.3
88	1	5	-2	1.53820	60.103	0.4
89	1	4	-3	1.53820	60.103	0.4
90	2	5	0	1.53440	60.260	1.9
91	3	3	1	1.53440	60.268	1.9
92	3	4	0	1.53050	60.437	6.1
93	2	2	-4	1.53050	60.437	6.1
94	2	4	-3	1.52130	60.841	0.2
95	2	4	0	1.52130	60.841	0.2
96	4	2	0	1.51320	61.202	0.6
97	4	2	-3	1.51320	61.202	0.6
98	1	2	-4	1.51050	61.323	0.3
99	0	5	2	1.50640	61.500	0.3
100	0	0	4	1.49920	61.836	5.2
101	4	3	-1	1.49610	61.978	18.3
102	4	3	-2	1.49610	61.970	10.3
103	2	5	-2	1.48530	62.479	0.9
104	1	3	3	1.48190	62.638	1.1
105	0	1	4	1.47750	62.846	0.2
106	0	4	3	1.47260	63.079	0.1
107	3	2	-4	1.46880	63.261	0.3
108	3	1	2	1.46620	63.387	0.9
109	2	0	3	1.45680	63.844	0.3
110	0	6	0	1.45180	64.090	3.0
111	2	1	3	1.43690	64.835	4.1

Stick Pattern



CaMgSi₂O₆ (Diopside)

Reference code:

00-017-0318

Mineral name:

Diopside

Compound name:

Calcium Magnesium Silicate

Empirical formula:

CaMgO₆Si₂

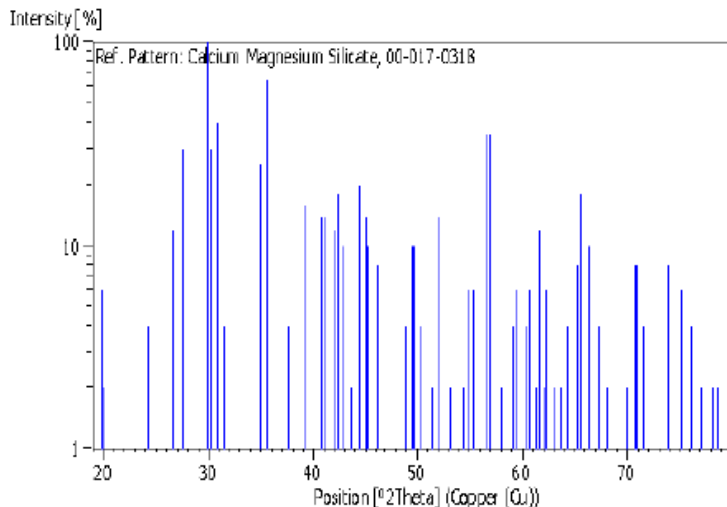
Chemical formula:

CaMg (SiO₃)₂

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	2	0	4.46200	19.882	6.0
2	-1	1	1	4.40700	20.133	2.0
3	1	1	1	3.66000	24.299	4.0
4	0	2	1	3.34300	26.544	12.0
5	2	2	0	3.23100	27.585	30.0
6	-2	2	1	2.99200	29.838	100.0
7	3	1	0	2.95100	30.262	30.0
8	-3	1	1	2.89400	30.873	40.0
9	1	3	0	2.83800	31.498	4.0
10	-1	3	1	2.56600	34.939	25.0
11	0	0	2	2.52400	35.539	65.0
12	-1	1	2	2.51800	35.627	65.0
13	1	3	1	2.38900	37.621	4.0
14	3	1	1	2.30100	39.117	16.0
15	1	1	2	2.21500	40.701	14.0
16	0	2	2	2.19800	41.030	14.0
17	3	3	0	2.15600	41.867	12.0
18	-3	3	1	2.13300	42.340	18.0
19	-4	2	1	2.10800	42.867	10.0
20	4	2	0	2.07500	43.593	2.0
21	0	4	1	2.04200	44.324	20.0
22	-4	0	2	2.01400	44.974	14.0
23	2	0	2	2.00600	45.163	10.0
24	-1	3	2	1.96800	46.085	8.0
25	3	3	1	1.86000	48.930	4.0
26	5	1	0	1.83500	49.542	10.0
27	2	2	2	1.83100	49.757	10.0
28	1	3	2	1.81300	50.286	4.0
29	4	2	1	1.77400	51.471	2.0
30	1	5	0	1.75400	52.102	14.0
31	-5	1	2	1.72000	53.212	2.0
32	-1	5	1	1.68400	54.442	2.0
33	-2	4	2	1.67300	54.830	6.0
34	-3	1	3	1.65800	55.368	6.0
35	-2	2	3	1.62400	56.631	35.0
36	4	4	0	1.61700	56.898	35.0
37	5	3	0	1.58600	58.115	2.0
38	6	0	0	1.56200	59.096	4.0
39	3	5	0	1.55000	59.599	6.0
40	-6	0	2	1.52900	60.503	4.0
41	4	0	2	1.52300	60.766	6.0
42	-5	3	2	1.50960	61.363	2.0
43	-1	3	3	1.50340	61.644	12.0
44	2	4	2	1.49180	62.176	2.0

45	0	6	0	1.48770	62.367	6.0
46	6	2	0	1.47500	62.965	2.0
47	4	4	1	1.46090	63.643	2.0
48	-6	2	2	1.44690	64.333	4.0
49	0	6	1	1.42670	65.356	8.0
50	5	3	1	1.42250	65.573	18.0
51	-3	5	2	1.40960	66.303	10.0
52	1	5	2	1.40720	66.378	10.0
53	2	2	3	1.38950	67.335	4.0
54	-7	1	1	1.37550	68.114	2.0
55	0	4	3	1.34390	69.945	2.0
56	-7	1	2	1.33050	70.754	8.0
57	6	2	1	1.32690	70.975	8.0
58	-5	3	3	1.31680	71.603	4.0
59	-2	6	2	1.28240	73.836	8.0
60	0	0	4	1.26240	75.206	6.0
61	3	5	2	1.24800	76.228	4.0
62	-1	7	1	1.23620	77.089	2.0
63	5	3	2	1.22220	78.138	2.0
64	-4	2	4	1.21740	78.505	2.0
65	0	2	4	1.21470	78.714	2.0



CaMgSi₂O₆ (Diopside)

Reference code: 01-070-2129

Compound name: Calcium Aluminum Silicate
 Common name: Tschermak's pyroxene, syn. calcium aluminium catena-alumosilicate

Empirical formula: $\text{Al}_2\text{CaO}_6\text{Si}$
 Chemical formula: $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$

Peak list

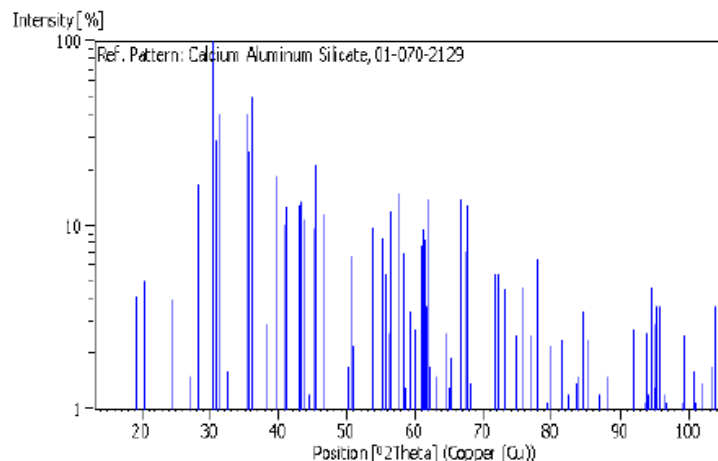
No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	6.31360	14.016	0.2
2	2	0	0	4.61700	19.208	4.1
3	-1	1	1	4.37710	20.272	0.5
4	0	2	0	4.32600	20.514	5.0
5	1	1	1	3.63120	24.495	3.9
6	0	2	1	3.29040	27.078	1.5
7	2	2	0	3.15680	28.247	16.8
8	-2	2	1	2.94080	30.370	100.0
9	3	1	0	2.90000	30.808	29.1
10	-3	1	1	2.85860	31.265	40.4
11	1	3	0	2.75290	32.498	1.6
12	0	0	2	2.53410	35.393	40.8
13	-2	0	2	2.53410	35.393	40.8
14	-1	1	2	2.52240	35.563	3.7
15	-1	3	1	2.50730	35.784	25.2
16	2	2	1	2.47750	36.229	49.8
17	1	3	1	2.33950	38.448	2.9
18	4	0	0	2.30850	38.985	0.7
19	3	1	1	2.27440	39.593	18.7
20	1	1	2	2.21160	40.767	10.1
21	-2	2	2	2.18660	41.254	12.7
22	0	2	2	2.18660	41.254	12.7
23	0	4	0	2.16300	41.725	0.7
24	3	3	0	2.10450	42.941	13.0
25	-3	3	1	2.08860	43.285	13.6
26	-4	2	1	2.07290	43.629	10.9
27	4	2	0	2.03660	44.448	1.2
28	-4	0	2	2.00480	45.192	9.7
29	2	0	2	2.00030	45.299	9.4

30	0	4	1	1.98940	45.561	21.6
31	2	4	0	1.95870	46.316	0.4
32	-1	3	2	1.94610	46.634	11.5
33	-2	4	1	1.90370	47.736	0.5
34	-5	1	1	1.86870	48.688	0.3
35	3	3	1	1.82520	49.926	0.9
36	-4	2	2	1.81900	50.108	1.2
37	2	2	2	1.81560	50.209	1.7
38	5	1	0	1.80610	50.491	6.7
39	-3	3	2	1.79220	50.911	2.2
40	1	3	2	1.79220	50.911	2.2
41	2	4	1	1.75890	51.946	0.1
42	4	2	1	1.74790	52.297	0.2
43	-1	1	3	1.71500	53.379	0.1
44	-5	1	2	1.70480	53.724	3.8
45	3	1	2	1.70080	53.860	9.9
46	1	5	0	1.70080	53.860	9.9
47	-3	1	3	1.66000	55.296	8.4
48	-2	4	2	1.64520	55.836	5.4
49	0	4	2	1.64520	55.836	5.4
50	-1	5	1	1.63780	56.111	2.6
51	-2	2	3	1.62270	56.680	12.0
52	-5	3	1	1.59470	57.768	15.0
53	-4	4	1	1.59470	57.768	15.0
54	1	5	1	1.58820	58.027	0.7
55	4	4	0	1.57840	58.422	7.1
56	5	1	1	1.57360	58.617	1.3
57	0	2	3	1.57360	58.617	1.3
58	5	3	0	1.55520	59.380	3.4
59	6	0	0	1.53900	60.069	2.7
60	-6	0	2	1.51440	61.148	7.6
61	4	0	2	1.51110	61.296	9.6
62	3	5	0	1.50840	61.417	8.3
63	-3	5	1	1.50140	61.735	3.6
64	-6	2	1	1.50140	61.735	3.6
65	-1	3	3	1.49590	61.987	13.9
66	-4	2	3	1.49140	62.195	2.7
67	-5	3	2	1.48920	62.297	1.7
68	-4	4	2	1.46860	63.271	1.5
69	2	4	2	1.46860	63.271	1.5
70	-3	3	3	1.45900	63.736	0.1
71	6	2	0	1.45000	64.179	0.4
72	0	6	0	1.44200	64.578	2.6

73	4	4	1	1.43210	65.079	1.3
74	-6	2	2	1.42930	65.222	1.2
75	4	2	2	1.42660	65.361	1.9
76	5	3	1	1.39830	66.655	14.0
77	0	6	1	1.38700	67.473	3.8
78	2	2	3	1.38450	67.611	7.2
79	-3	5	2	1.38100	67.805	12.9
80	1	5	2	1.38100	67.805	12.9
81	2	6	0	1.37640	68.063	1.4
82	-2	4	3	1.36070	68.958	0.9
83	-2	6	1	1.35560	69.255	1.0
84	-7	1	1	1.35560	69.255	1.0
85	0	4	3	1.33140	70.699	1.0
86	-2	0	4	1.31800	71.528	1.0
87	3	1	3	1.31800	71.528	1.0
88	-7	1	2	1.31510	71.710	5.4
89	5	1	2	1.31250	71.874	0.8
90	-5	3	3	1.30690	72.230	5.4
91	6	2	1	1.30690	72.230	5.4
92	-3	1	4	1.29110	73.257	4.5
93	-1	1	4	1.29110	73.257	4.5
94	-6	4	1	1.28680	73.542	0.4
95	-5	5	1	1.28350	73.762	0.3
96	-4	4	3	1.28050	73.964	0.3
97	-6	2	3	1.27700	74.200	0.1
98	0	0	4	1.26700	74.886	2.5
99	5	5	0	1.26270	75.185	0.1
100	-2	2	4	1.26120	75.290	0.1
101	0	6	2	1.25330	75.848	4.6
102	-2	6	2	1.25330	75.848	4.6
103	4	4	2	1.23870	76.904	2.5
104	-7	3	1	1.23870	76.904	2.5
105	-4	6	1	1.23070	77.497	0.6
106	-1	5	3	1.23070	77.497	0.6
107	1	7	0	1.22520	77.911	6.5
108	3	5	2	1.22520	77.911	6.5
109	-4	2	4	1.21730	78.513	0.6
110	3	3	3	1.21040	79.048	0.2
111	-3	5	3	1.21040	79.048	0.2
112	-7	3	2	1.20820	79.220	0.6
113	5	3	2	1.20620	79.378	1.1
114	-7	1	3	1.20370	79.575	0.6
115	-5	1	4	1.20090	79.798	2.2

116	-1	7	1	1.20090	79.798	2.2
117	-1	3	4	1.18950	80.719	0.7
118	-3	3	4	1.18950	80.719	0.7
119	7	1	1	1.18700	80.925	0.4
120	-8	0	2	1.18090	81.430	2.4
121	1	7	1	1.18090	81.430	2.4
122	5	5	1	1.17430	81.986	0.4
123	1	5	3	1.16920	82.421	1.2
124	2	6	2	1.16920	82.421	1.2
125	-8	2	1	1.15600	83.572	1.4
126	8	0	0	1.15420	83.732	1.5
127	4	6	1	1.15100	84.018	0.2
128	-6	0	4	1.14600	84.469	3.4
129	3	7	0	1.14600	84.469	3.4
130	-8	2	2	1.13920	85.091	0.8
131	6	2	2	1.13700	85.295	2.4
132	-6	4	3	1.13700	85.295	2.4
133	-2	4	4	1.12580	86.349	0.2
134	-1	7	2	1.11920	86.985	0.7
135	-5	5	3	1.11810	87.092	1.2
136	-5	3	4	1.11810	87.092	1.2
137	8	2	0	1.11520	87.376	0.2
138	-2	6	3	1.11300	87.592	0.1
139	7	3	1	1.10580	88.310	1.5
140	2	2	4	1.10580	88.310	1.5
141	0	6	3	1.09680	89.226	0.6
142	-4	4	4	1.09480	89.433	0.6
143	5	1	3	1.09480	89.433	0.6

Stick Pattern



Lampiran C (Hasil Uji EDX)

Hasil Uji EDX Pasir Besi



**LABORATORIUM PENGOLAHAN MINERAL DAN MATERIAL
JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

Telp. (031) 5443645, 001252992373, Email : saugti@fmat-eng.its.ac.id

Surabaya, 22 September 2016

No : 09/LTPMM/IX/2016
Hal : Laporan Hasil Pengujian SEM-EDX
Lampiran : -

LAPORAN HASIL PENGUJIAN

Berdasarkan permohonan pengujian yang diberikan, maka telah dilakukan pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) + Electron Dispersive X-Ray (EDX) untuk sampel pasir besi Sukabumi. Berikut ini ialah hasil pengujian dan analisa uji SEM dan EDX tersebut.



Gambar 1. Hasil pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) sampel pasir besi Sukabumi

Tabel 1. Hasil Pengujian EDX Pasir Besi Sukabumi

No	Element	Wt%	At%
1	O	24.44	49.59
2	Mg	2.72	3.64
3	Al	2.66	3.20
4	Si	1.14	3.63
5	Ca	0.65	0.53
6	Ti	8.46	5.73
7	Fe	56.93	33.68

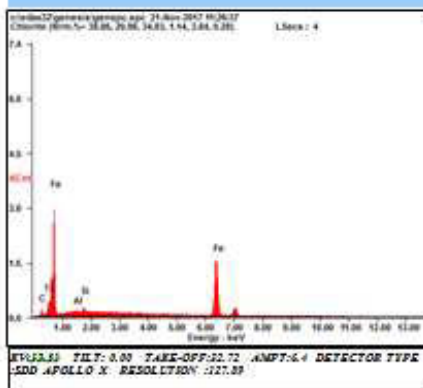
Hasil Uji EDX Pig Iron 140 A

Microanalysis Report

Prepared for: Company Name Here

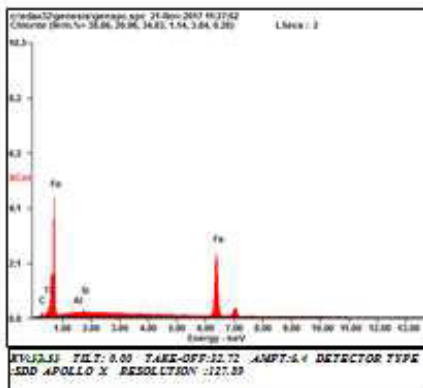
Prepared by: Your Name Here

11/21/2017



Element	Wt %	At %
Ca	01.49	06.44
TiL	05.69	06.17
AlK	00.33	00.63
SiK	00.77	01.42
FeK	91.73	85.34

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS-SEC
 TABLE: DEFAULT



Element	Wt %	At %
Ca	03.14	12.82
TiL	08.87	09.08
AlK	00.34	00.62
SiK	00.55	00.96
FeK	87.10	76.51

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS-SEC
 TABLE: DEFAULT

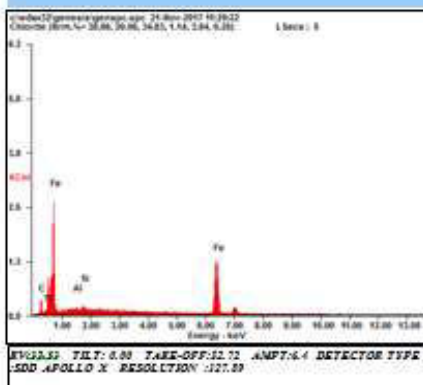
Hasil Uji EDX Pig Iron 160 A

Microanalysis Report

Prepared for: Company Name Here

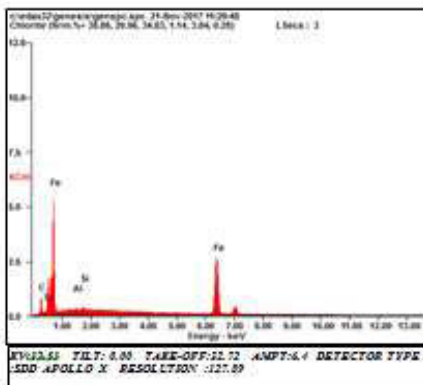
Prepared by: Your Name Here

11/21/2017



Element	Wt %	At %
C K	02.96	12.17
Ti L	09.56	09.84
Al K	00.25	00.46
Si K	00.60	01.06
Fe K	86.62	76.47

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS-SEE
TABLE: DEFAULT



Element	Wt %	At %
C K	00.74	03.31
Ti L	04.39	04.92
Al K	00.12	00.24
Si K	00.42	00.80
Fe K	94.33	90.73

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS-SEE
TABLE: DEFAULT

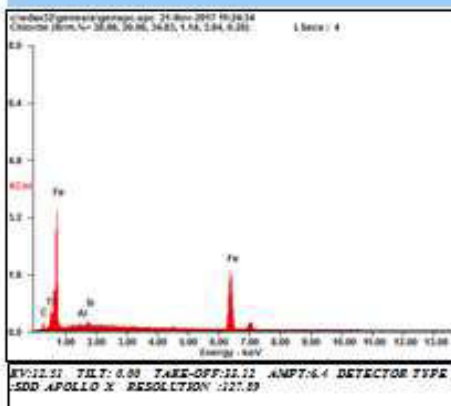
Hasil Uji EDX Pig Iron 180 A

Microanalysis Report

Prepared for: Company Name Here

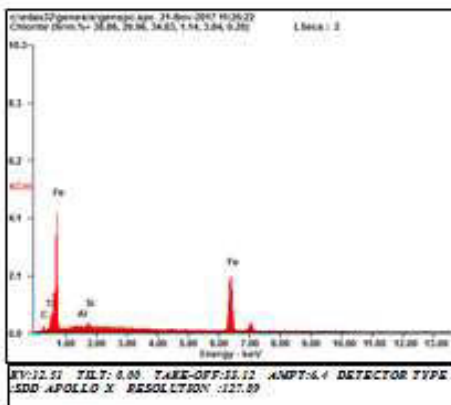
Prepared by: Your Name Here

11/21/2017



Element	Wt %	At %
C K	01.29	05.61
Ti L	06.18	06.76
Al K	00.16	00.31
Si K	00.69	01.29
Fe K	91.69	86.03

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
TABLE: DEFAULT



Element	Wt %	At %
C K	01.40	06.07
Ti L	06.01	06.53
Al K	00.21	00.41
Si K	00.90	01.68
Fe K	91.48	85.32

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
TABLE: DEFAULT

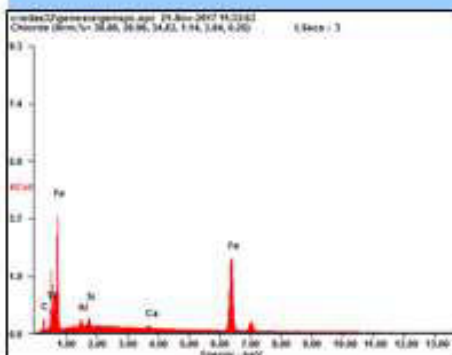
Hasil Uji EDX Pig Iron 200 A

Microanalysis Report

Prepared for: *Company Name Here*

Prepared by: *Your Name Here*

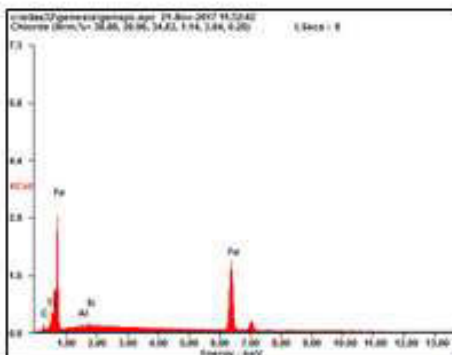
11/21/2017



Element	WT %	At %
C K	01.97	08.23
Ti L	09.70	10.18
Al K	00.98	01.83
Si K	01.01	01.81
Ca K	00.68	00.86
Fe K	83.63	77.09

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS-SEC
 TABLE : DEFAULT

WV:12.51 TiL: 0.00 TAKE-OFF:12.27 AMPT:6.4 DETECTOR TYPE
 SDD APOLLO X RESOLUTION:127.59



Element	WT %	At %
C K	01.20	05.28
Ti L	03.87	06.47
Al K	00.17	00.33
Si K	00.28	00.52
Fe K	92.49	87.41

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS-SEC
 TABLE : DEFAULT

WV:12.51 TiL: 0.00 TAKE-OFF:12.27 AMPT:6.4 DETECTOR TYPE
 SDD APOLLO X RESOLUTION:127.59

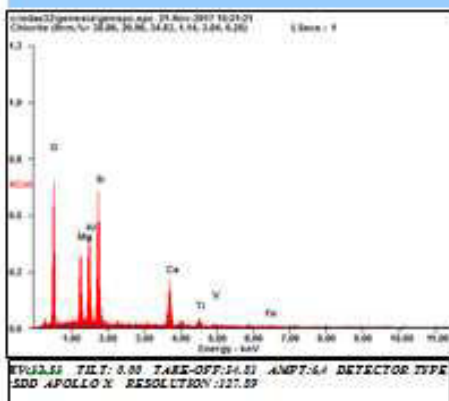
Hasil Uji EDX Slag 140 A

Microanalysis Report

Prepared for: *Company Name Here*

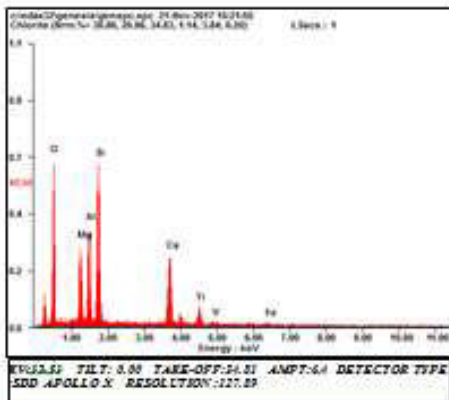
Prepared by: *Your Name Here*

11/21/2017



Element	WT %	At %
O K	36.19	52.34
Mg K	09.44	08.99
Al K	11.88	10.18
Si K	19.66	16.20
Ca K	15.23	08.79
Ti K	04.77	02.30
V K	00.93	00.42
Fe K	01.90	00.79

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS-SEC
 TABLE: DEFAULT



Element	WT %	At %
O K	53.38	50.58
Mg K	07.58	07.56
Al K	09.58	08.61
Si K	18.49	15.96
Ca K	19.35	11.71
Ti K	07.24	03.66
V K	00.60	00.29
Fe K	03.77	01.64

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS-SEC
 TABLE: DEFAULT

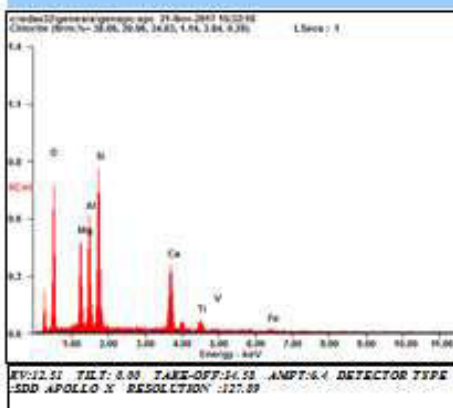
Hasil Uji EDX Slag 160 A

Microanalysis Report

Prepared for: Company Name Here

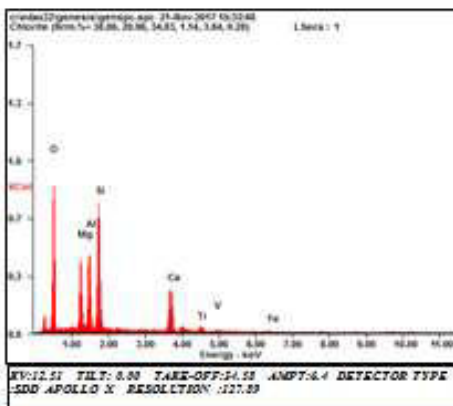
Prepared by: Your Name Here

11/21/2017



Element	Wt %	At %
O K	31.74	48.04
MgK	08.71	08.67
AlK	11.38	10.21
SiK	19.59	16.89
CaK	19.92	12.04
TiK	05.12	02.59
V K	00.68	00.32
FeK	02.85	01.24

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
 TABLE : DEFAULT



Element	Wt %	At %
O K	36.90	53.01
MgK	09.40	08.88
AlK	11.18	09.52
SiK	20.22	16.54
CaK	16.04	09.20
TiK	03.58	01.72
V K	00.71	00.32
FeK	01.97	00.81

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
 TABLE : DEFAULT

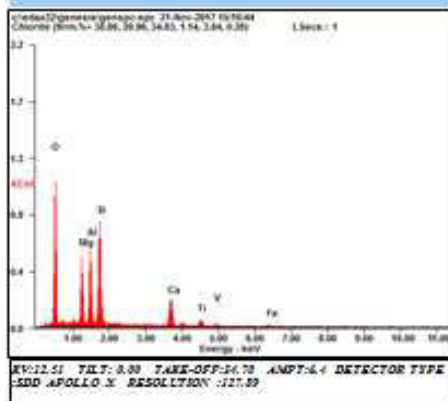
Hasil Uji EDX Slag 180 A

Microanalysis Report

Prepared for: Company Name Here

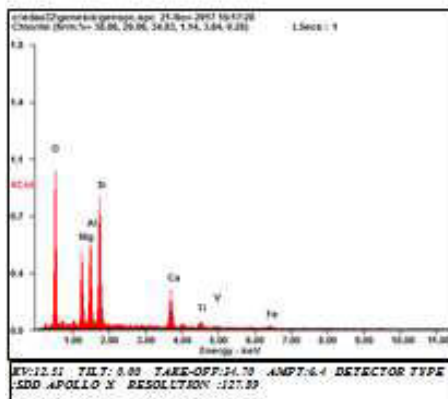
Prepared by: Your Name Here

11/21/2017



Element	Wt %	At %
O K	39.44	55.83
MgK	09.37	08.73
AlK	11.32	09.50
SiK	18.91	15.25
CaK	11.29	06.38
TiK	05.22	02.47
V K	00.87	00.39
FeK	03.57	01.45

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
 TABLE : DEFAULT



Element	Wt %	At %
O K	36.25	52.78
MgK	09.34	08.95
AlK	11.19	09.66
SiK	19.81	16.43
CaK	12.42	07.22
TiK	04.72	02.30
V K	01.22	00.56
FeK	05.04	02.10

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
 TABLE : DEFAULT

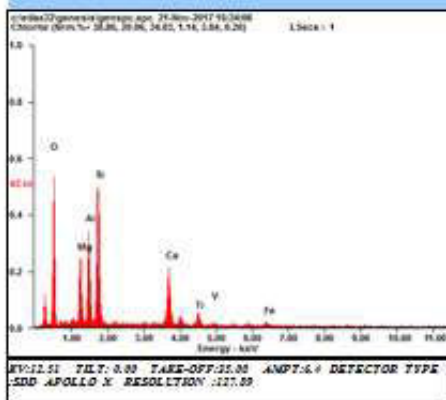
Hasil Uji EDX Slag 200 A

Microanalysis Report

Prepared for: Company Name Here

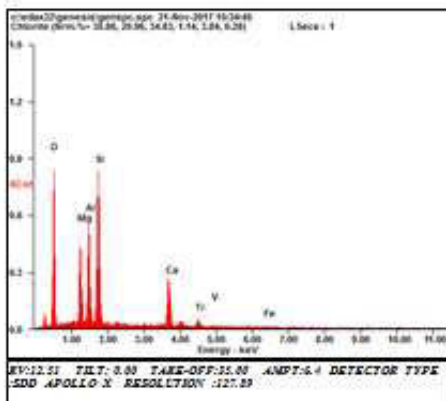
Prepared by: Your Name Here

11/21/2017



Element	Wt %	At %
O K	33.42	50.47
MgK	07.66	07.61
AlK	10.36	09.28
SiK	19.42	16.70
CaK	16.58	10.00
TiK	06.46	03.26
V K	00.92	00.44
FeK	05.18	02.24

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
 TABLE : DEFAULT



Element	Wt %	At %
O K	34.33	50.03
MgK	09.58	09.19
AlK	11.92	10.30
SiK	22.29	18.50
CaK	15.74	09.15
TiK	03.76	01.83
V K	00.30	00.14
FeK	02.08	00.87

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
 TABLE : DEFAULT

Hasil Uji XRF Batu Kapur

Date: October 2014

PT. ASIA RESOURCES SELATAN

Integrity Office

Source: NHTD, 8/78, Photo 5483

B. Hawks National Hwy. 121 Lawrenceville, GA 30046

REPORT OF ANALYSIS

CLIENT

MATERIAL & METALLURGICALS

THE FOLLOWING SAMPLE (S) WAS/WERE SUBMITTED AND IDENTIFIED BY CLIENT AS:

TYPE OF SAMPLE

HAYU KAPTEH

DATE OF RECEIPT: _____

October 16, 2014

DATE OF ANALYSIS

October 17, 2014

DESCRIPTION: SAMPLE

PCHEM powder

Wang et al. / Violence 19(1) 83

Packing: 1 untreated polymer bag

SAMPLE IDENTIFICATION

42nd Annual Meeting - November 1998

(STATED BY CLIENT)

We have tested the sample (s) submitted and the following results were obtained:

No.	Parameter	Unit	Test Result	Test Method
1.	Kalium (Ca)	% wt	10,082	X - Ray Fluorescence
2.	Magnesium (Mg)	% wt	13,742	X - Ray Fluorescence
3.	Silikon (Si)	% wt	0,546	X - Ray Fluorescence
4.	Besi (Fe)	% wt	0,072	X - Ray Fluorescence
5.	Sulfur (S)	% wt	0,041	X - Ray Fluorescence
6.	Aluminium (Al)	% wt	0,004	X - Ray Fluorescence
7.	Zincum (Zn)	% wt	0,0007	X - Ray Fluorescence

This Certificate/Report is issued under our General Terms and Conditions, copy of which is available upon request or can be accessed at www.mca.com

Myra B. Jones

Albert Einstein

Lampiran D (Hasil Uji *Proximate Analysis* Batubara)

LAPORAN HASIL PENGUJIAN

Nama Pemilik : M. Riliy Mahendin
 Alamat Pemilik : T.Material & Metalurgi ITS
 Nama Contoh : Batubara
 Deskripsi : Bentuk : + Pulas/Gain/Ges
 Contoh : Volume : +/-
 Kemasan : Plastik
 Kode Contoh : E1-0513
 Tanggal Terima : 15 Ags 2016
 Tanggal Pengujian : 22 Ags 2016
 Tanggal Selesai Pengujian : 13 Sep 2016
 Jumlah Contoh : 1

Menyatakan bahwa contoh tersebut di atas telah diuji di Laboratorium Energi – LPPM ITS.

Hasil Pengujian

No.	Nama Contoh	Jenis Uji	Hasil	Satuan	Metode Pengujian
1	Batubara	Total Moisture	4,17	% As	ASTM D 3302-15
		Moisture in Sample	3,30	% Air	ASTM D 3175-11
		Ash Content	10,30		ASTM D 3174-12
		Volatile Matter	42,08		ASTM D 3175-11
		Fixed Carbon	44,32		ASTM D 3175-13
		Kalori	6706	Cal/gr	Bomb kalorimeter
		HGI	28	-	ASTM D 409-11

Suhu : 20,3 °C
 Humidity : 48 %
 Analis : MBB

Catatan:

1. Laporan Hasil Pengujian tidak boleh digandakan tanpa persetujuan tertulis dari Laboratorium Energi.
2. Hasil pengujian hanya berlaku untuk contoh yang diuji.
3. Hasil pengujian ini tidak dapat digunakan sebagai alat bukti hukum.

Mengetahui,
 Manajer Teknis



Vita Yuliana, S.Si
 NIP. 914014001

Lampiran G (Dokumentasi Penelitian)



Briket pasir besi



Muffle furnace ketika proses reduksi



Briket di dalam krusibel setelah akhir proses reduksi



Persiapan proses peleburan *sponge iron*



Proses sebelum peleburan *sponge iron*



Proses peleburan *sponge iron*



Hasil peleburan *sponge iron* dengan arus 140 A



Hasil peleburan *sponge iron* dengan arus 160 A



Hasil peleburan *sponge iron* dengan arus 180 A



Hasil peleburan *sponge iron* dengan arus 200 A

UCAPAN TERIMA KASIH

Penghargaan dan ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah ikut berperan serta terhadap penulisan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan YME karena dengan rahmat dan kuasa-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan baik dan tepat waktu.
2. Orang tua Penulis, Bapak Tony Wijaya dan Ibu Ong Yon Nio dan Kakak penulis Lugi Wijaya, Ade Wijaya dan Elvina Januarti serta keponakan penulis Ivander Wijaya yang telah mendukung penulis baik secara materiil maupun non-materiil melalui doa, motivasi dan semangat yang tak ternilai harganya.
3. Bapak Wikan Jatimurti, ST., M.Sc. selaku dosen pembimbing tugas akhir dan telah memberikan ilmu, bimbingan serta wawasan kepada penulis.
4. Bapak Sungging Pintowantoro, S.T., M.T. Ph.D selaku dosen copembimbing tugas akhir penulis yang telah memberikan arahan saat menulis Tugas akhir ini.
5. Bapak Fakhreza Abdul S.T, M.T yang telah menuangkan segala bimbingan, ilmu dan pelajaran mengenai tugas akhir dan kehidupan selama berada di Laboratorium Teknologi Pengolahan Mineral dan Material.
6. Ibu Dr. Widyastuyti S.Si., M.Si. selaku Dosen Wali penulis selama menempuh pendidikan di Departemen Teknik Material FTI-ITS.
7. Bapak Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng. selaku Ketua Departemen Teknik Material FTI-ITS.
8. Mbak Russalia Istiani, A.Md selaku pengurus Laboratorium Karakterisasi Material yang telah membantu penulis dalam pengujian pada penyelesaian tugas akhir ini.

9. Saudara Isrouf Gerio Pangestu dan Treshna Satria Purnamawan yang telah membantu dan menemani penulis dalam mengerjakan tugas akhir.
10. Teman-teman penghuni lab tercinta Laboratorium Teknologi Pengolahan Mineral dan Material yang telah menemani penulis selama melaksanakan kegiatan tugas akhir, Abay, Icill, Luki, Yoso, Opik, Tommi, Nisya, dan Prita
11. Kawan-kawan yang telah banyak berkiprah membantu penulis selama kuliah Iqbal (Ibul), Ridho, Octavian (Aseng), Rahadian (Ian), Aabyan (bos) dan Rama.
12. Kawan seperjuangan Kp Adnan (Jijah), Bima, Fahri, Ghifarri, Haris, Sherly, Bang Ucup dan kawan-kawan lainnya seperjuangan KP Antam Pongkor.
13. Kawan-kawan perjalanan penulis yang membuat penulis dapat merilekskan pikirannya Hannan (Ahong), Bagus, Jehan (Jeje) dan Yusuf (Ucup).
14. Teman-teman pelarian Rama (Semi) dan Ivan.
15. Teman-teman kontrakan Tiliskitip yang telah menemani penulis selama kuliah.
16. Teman-teman ITS Smansasi yang masuk ITS bareng bareng dari sma tercinta.
17. Mas dan mbak alumni lab ekstraksi yang telah memberi banyak ilmu, wejangan dan pengetahuan terkait tugas akhir.
18. Dosen dan karyawan yang telah membantu penulis untuk menyelesaikan perkuliahan di Departemen Teknik Material FTI-ITS.
19. Teman-teman MT 16 yang selalu membantu penulis dengan baik.
20. Teman-teman satu organisasi penulis saat menjadi pengurus organisasi dan alumni organisasi selama menjadi mahasiswa.
21. Serta seluruh pihak yang telah memberikan partisipasi atas penulisan tugas akhir ini.

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kota Bekasi, 18 April 1996, merupakan anak ketiga dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Wirabakti 3, SDN Bekasi Jaya IX, kemudian SMP Negeri 3 Bekasi dan SMA Negeri 1 Bekasi. Setelah lulus dari SMA penulis melanjutkan studinya melalui jalur SNMPTN di Departemen Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2014 terdaftar dengan NRP 02511440000057. Di Teknik Material dan Metalurgi penulis memilih bidang Metalurgi Ekstraksi. Penulis sejak kuliah aktif mengikuti organisasi di Senat Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (SM3) sebagai Staff. Berbagai pelatihan seperti LKMM Pra TD dan LKMM TD pernah diikuti oleh penulis. Penulis dapat dihubungi melalui email ke luki_wijaya96@yahoo.com.

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)